

海底天然气水合物赋存的间接识别标志

赵省民¹ 吴必豪¹ 王亚平² 卢振权¹

(1. 中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院测试研究所, 北京 100037)

摘要: 天然气水合物是近十多年来发现的一种新型超级洁净能源, 因其在能源勘探、海底灾害环境和全球气候变化研究中的重要性而日益引起世界各国的高度重视。尽管此种化合物通常分布于大陆边缘沉积物和极地永冻层内, 但前者的水合物赋存量占据全球天然气水合物总量的90%以上。鉴于此, 拟就该种化合物在海底沉积物中赋存的间接标志进行详细讨论, 以使人们在不进行沉积物取样或没有采集到水合物样品的情况下, 也能快速准确地确定此种化合物的分布。

关键词: 天然气水合物; 识别标志; 海洋地质学。

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)06-0624-05

作者简介: 赵省民, 男, 副研究员, 1964年生, 1997年毕业于中国地质大学(北京)能源系, 获理学博士学位, 现从事海洋地质与矿产资源地质研究。

天然气水合物(gas hydrates)是在低温(0~10℃±)高压(>10 MPa)条件下形成的、由水分子和气体分子组成的、具有笼状结构的似冰状结晶化合物^[1], 因其中的气体多以甲烷为主(>90%), 故也被称为甲烷水合物(methane hydrates)。构成该种化合物的气体, 除了主要气体组成——甲烷外, 还有少量乙烷、丙烷等烃类气体和氮气、硫化氢等其他气体。此种化合物的形成条件决定了其通常分布于两类地区: 一是水深300~3 000 m的陆架斜坡和深海盆地沉积物内; 另一是高纬度的极地永冻层内。但是, 前者占据全球天然气水合物总量的90%以上。

目前, 天然气水合物的研究与开发在国际上备受关注。美、日、加等西方发达国家已制定出商业性开发此种化合物的研究计划, 并已着手进行天然气水合物的开采性实验。印度、巴基斯坦等发展中国家也开始投巨资进行此方面的研究。该种化合物研究受到如此高度关注的最主要原因是由于它是一种潜力巨大、前景诱人的超级能源, 其资源总量是全球所有已知常规矿物燃料(煤、石油和天然气)总和的两倍。另一方面, 此种化合物的形成与演化还是海底地质灾害和全球气候变化的潜在诱发因素。所以, 无论

从寻找战略储备能源的角度看, 还是从灾害防治和维护人类生存环境的角度看, 对天然气水合物的研究均具有重要意义。

由于天然气水合物形成与赋存条件的特殊性, 迄今除了海底钻探和海底沉积物取样业已获得少量海底天然气水合物样品外, 世界各地绝大多数天然气水合物的分布是通过地质的、地球物理的和地球化学等间接的方法确定的。为此, 本文拟就此种化合物赋存的间接识别标志进行阐述。

1 地质标志

作为一种极具远景的地质矿产资源, 天然气水合物赋存的地质标志是其最基本的识别标志。就目前来看, 此种化合物的分布在地质上可从海底地貌、海底沉积层特征及沉积学特征等方面来加以判别。

(1)海底地貌。天然气水合物赋存区的海底通常有一系列的麻坑(pockmark)、泥火山锥(mud volcano)和泥质丘(mud mound)。这是因为, 在具备天然气水合物形成背景条件(低温高压)的海底沉积物内, 烃类气体负载流体的定向运移是此种化合物形成的必要条件^[2,3](此种地质过程为其形成提供了源源不断的烃类过饱和流体)。因此, 天然气水合物分布区的富烃类流体的活动十分活跃, 从而在海底

形成这种特征的泄气海底地貌。

(2)海底沉积层特征。赋存天然气水合物的沉积物岩性呈粥状(据钻探分解),且附近往往有异常干的沉积带(anomalously dry sediment zones)分布。同时,邻近地层中还经常出现泥质底辟构造。其成因是,随着水合物的形成,水分子和烃类气体分子的结晶会不断将临近沉积物中的水分子抽吸到发生结晶作用的前端(crystallization front),而使邻近地层的孔隙水濒临枯竭,最终导致这些地层极度失水而成为异常干的沉积层^[2]。此外,水合物形成层段附近富烃类流体的强烈活动还导致邻近地层内部形成广为分布的泥底辟(mud diapir)。

(3)沉积物特征。除了上述两个物理特征外,此种化合物赋存层段的上覆地层还普遍分布自生的碳酸盐结核、碳酸盐丘(carbonate buildup),或者其中的自生碳酸盐矿物含量较高而硫酸盐矿物含量却很低。这是由于,富烃类流体中的甲烷在垂直向上运移的过程中逐渐为沉积物中的硫酸根离子所氧化($\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \xrightarrow{\text{微生物作用}} \text{HS}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$)^[4],从而在近海底的沉积物中形成丰富的碳酸盐丘、自生碳酸盐结核或自生的碳酸盐矿物和硫化物矿物,而其中的硫酸盐矿物则消耗殆尽。

此外,赋存天然气水合物的海底还伴生有生物礁(bioherm)、菌席(bacterial mat)、生物化学合成管和蚌蛤类生物等。

2 地球物理标志

截止目前,地球物理勘探仍是天然气水合物勘查的主要手段;因此,地球物理特征的识别在此种化合物的勘探中有着特殊重要的地位。

2.1 反射地震标志

(1)BSR(bottom-simulating reflector)。被译作拟海底反射层,是反射地震剖面上特征的、近似平行于海底展布的反射层(图1),通常与沉积层面斜交^[5]。一般认为,此种特征反射是由平行于海底的带状水合物层(天然气水合物稳定带)与其下伏游离气体带之间波阻抗($\rho \cdot v$)差异所致。BSR是最早也是目前使用最多、最可靠、最直观的确证天然气水合物赋存的地球物理标志,迄今所确认的海底天然气水合物绝大多数就是通过反射地震剖面上BSR的识别实现的。

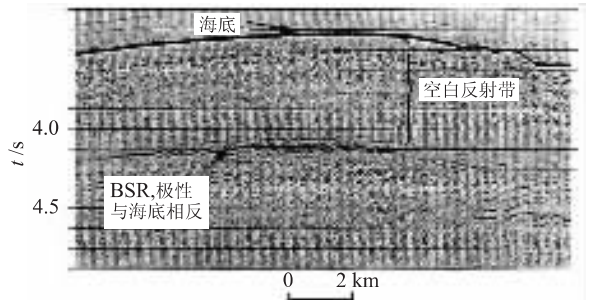


图1 天然气水合物的地震响应(据 Lee 等^[6]修改)
Fig.1 Response of gas hydrate to seismic reflection

(2)空白反射带(blanking zone)。空白反射带通常是与BSR相伴生的反射特征,是由天然气水合物对沉积物胶结而使其在声学上呈现均一响应的结果,在反射剖面上表现为均匀反射或空白反射(blanking reflection)。垂向上此反射带上与海底沉积层呈逐渐过渡,下以BSR为界与下伏游离气体带显现突变接触^[7](图1)。

(3)极性反转(reversal polarity)。该标志也是与上述两特征相伴生的地震反射特征。它最显著的特征是,BSR层的反射极性与海底反射极性相反(图1)。这是由于,反射波的极性是由反射界面的反射系数(R)决定的,而反射系数则与界面两侧介质的波阻抗差异($\rho_1 \cdot v_1 - \rho_2 \cdot v_2$)有关,因此,BSR层的反转极性是 $\rho_1 \cdot v_1 - \rho_2 \cdot v_2 < 0$ (亦即下伏游离气体带的波阻抗小于天然气水合物稳定带的波阻抗)的结果。此特征是确认BSR真实性的关键所在,在近水平的沉积层中尤其如此^[5]。

(4)VAMPS结构(速度振幅结构)。这是最初发现于太平洋北端的阿留神海底盆地、后在阿曼湾也有所见的地震反射结构。该反射结构的特征是,BSR之上表现为速度上拉(velocity pullup)的拱形结构,BSR以下则为速度下拉(velocity pulldown)的漏斗状结构(图2),二者通常成对出现,但有时仅有速度下拉结构。一般认为,速度上拉是由块状集合体的水合物引起的,而速度下拉则是下伏游离气体所致^[8]。

(5)AVO结构(振幅随炮检距变化)。这也是一种特征的反射结构,表现为BSR处的反射振幅随炮检距(或入射角)的变化而改变。该结构的形成系BSR之上的含水合物沉积物与下伏的含游离气体沉积物之间存在明显的泊松比(σ)差异引起的^[3]。在油气勘探中,通常将此结构视作油气藏中存在天然气的有力证据,并将其作为含油性研究的主要手段。

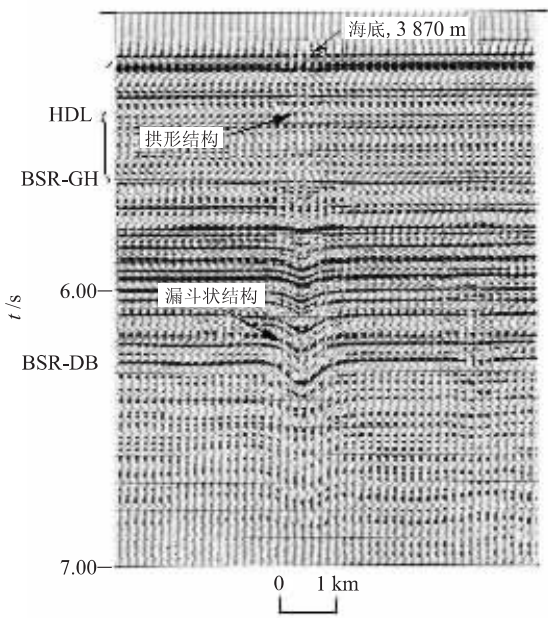


图 2 天然气水合物导致的 VAMP'S 结构(据 Scholl 等^[8]修改)
Fig. 2 VAMP'S structure of gas hydrate on seismic section

2.2 测井标志

除了反射地震外,井下地球物理测量也是天然气水合物勘探的主要手段之一.目前,已成功应用于此种化合物勘探的有:井径测量、自然电位、自然伽玛、侧向测井、声波测井及中子孔隙度测井等.

(1)井径测量.井径在天然气水合物赋存层段增大(图 3).这是由于钻探过程中机械磨擦生成的热量引起井筒周围的水合物分解所致.

(2)自然电位.天然气水合物分布层段的自然电位降低(图 3).其原因可能是,钻探引起的水合物分解除了造成水合物分布层段井径的扩大外,还使得该井段泥浆离子浓度降低,从而导致泥浆活度降低,进而使水合物上下岩层的高活度地层水向该井段扩散(Cl^- 离子扩散速度 $>$ Na^+ 离子^[9]),最终使水合物赋存井段泥浆负电荷数增多而呈现负的电位异常.

(3)自然伽玛.天然气水合物赋存层段的自然伽玛曲线表现为箱状降低的谷值(图 3).众所周知,沉积层自然伽玛能谱的强弱与对放射性元素有强烈吸附作用的粘土含量有关.水合物在形成时不但要从上下地层中吸取大量的水分子^[2],还要吸收大量来自下伏沉积物的烃类气体,由此导致单位体积沉积物内的粘土含量相对减少,使水合物赋存层段的自然伽玛曲线降低.

(4)侧向测井.侧向测井曲线在天然气水合物分布层段呈现急剧增高的箱状(图 3).这是由于水合

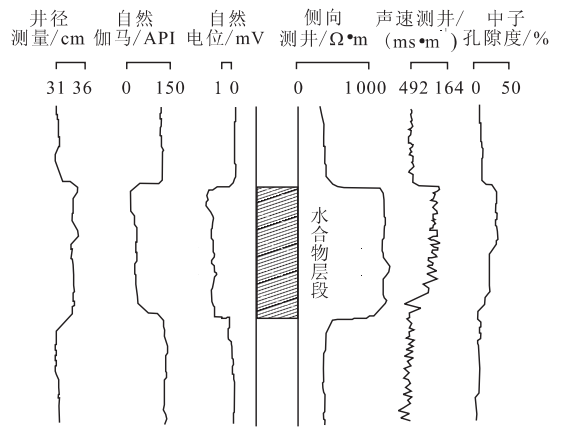


图 3 天然气水合物的测井响应(据 Kvenvolden^[5]修改)
Fig. 3 Response of gas hydrate to logging

物的形成使得沉积物孔隙中的流体变为固态,从而阻止了流体在沉积物中的运移而使含水合物层段沉积物的电阻增大所致.

(5)声波测井.含天然气水合物层段的声波时差值(Δt)降低(图 3).从 $\Delta t = 1/v$ 可以看出,沉积层的声波时差与其对声波的传播速度成反比,而无论是纵波还是横波,其传播速度都与传播介质的机械性质有密切关系.实验已经证实,天然气水合物的形成及其对沉积物的胶结会引起沉积物杨氏模量 E ($E = F \cdot L / (S \cdot \Delta L)$, F 为作用于物体上的力, L 为物体长度, S 为物体横截面积, ΔL 为单位长度的变形量)增大、密度(ρ)减小和其他一些机械性质的改变.若忽略泊松比(σ)变化的影响,由速度模型 $v_p = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma) \cdot (1-2\sigma)}}$ 和 $v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$ 可知^[9],水合物的形成将分别引起沉积物 v_p 和 v_s 的增大,从而导致 Δt 的减小.

(6)中子孔隙度.天然气水合物赋存层段的中子孔隙度增大(图 3).这是因为,中子测井值反映的是地层中的氢含量,对于砂质沉积物而言,则大体反映了为流体充满的孔隙度^[9].当水合物形成时,一方面要从邻近地层中汲取大量淡水;另一方面,单位体积水合物中有 20% 的水为固态甲烷所取代,此二因素将会引起单位体积沉积物内的含氢量大大增加.即使考虑到水合物形成造成的沉积物密度降低还会适当减少沉积物的含氢量,但最终结果也是单位体积内沉积物的含氢量增加,从而导致中子孔隙度增加.

此外,海底旁侧声纳扫描图及地震反射剖面上的泥火山、泥底辟等都是天然气水合物可能赋存的

间接识别标志.

3 地球化学标志

除了地质和地球物理标志外,天然气水合物还有许多地球化学上的赋存特征.

3.1 有机地球化学标志

(1)底层水甲烷浓度异常.一般地,天然气水合物赋存区域上方的海底水体具有明显的甲烷浓度异常.这是因为,水合物的形成和赋存与其下伏游离气体处于一种动态平衡状态,当有断裂系统切穿水合物稳定带而将下伏游离气体带与海底沟通时,便将甲烷气体排至海底水体中并形成气体羽(gas plume)^[2],从而引起海底水的甲烷浓度异常.

(2) R 值($C_1/(C_2+C_3)$)特征.天然气水合物赋存层段沉积物中的 R 值通常为 $100n$ (n 值为 $1\sim 9$) $\sim 10\ 000$.其原因是,在多数情况下,水合物中的甲烷气体主要是微生物作用于有机质的产物.当气体是热解或混合成因的, R 值则可能低于或略大于 100 .

3.2 无机地球化学标志

(1) Cl^- 离子浓度急剧减小.通常,水合物分布层段沉积物的 Cl^- 离子浓度急剧减小.这是由于,天然气水合物形成过程中要不断从邻近地层中汲取孔隙淡水,由此导致水合物赋存层段的盐度降低而淡化.从理论上讲,该层段所有离子的浓度都应降低,只是 Cl^- 离子浓度的这种异常变化更为显著^[10].

(2) SO_4^{2-} 离子浓度降低.天然气水合物赋存层段沉积物的 SO_4^{2-} 离子浓度同样呈现降低的趋势.其原因除了上述水合物形成过程导致的孔隙水淡化外,富烃类流体在向海底底床运移的过程中,甲烷气体会还原海底沉积物中的 SO_4^{2-} 离子而将之不断消耗,从而造成 SO_4^{2-} 离子浓度自海底向水合物稳定带的降低趋势.

4 结语

海底沉积物中赋存的天然气水合物具有各种地质、地球物理和地球化学证据.即使不进行海底钻探或海底沉积物取样,也可通过上述标志的识别来判

断其存在与否;但是为了准确起见,最好对各种标志进行综合分析,以提高天然气水合物勘探的精确度.

参考文献:

- [1] Max M D, Dillon W P. Oceanic methane hydrate: the character of the Black Ridge hydrate stability zone, and the potential for methane extraction [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1998, 21(3): 343~357.
- [2] Hovland M, Gallagher J W. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: example from the Niger delta front [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(3): 245~255.
- [3] Hyndman R D, Davis E R. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B5): 7025~7041.
- [4] Clayton C J, Hay S J, Baylis S A, et al. Alteration of natural gas during leakage from a North Sea salt diapir field [J]. *Marine Geology*, 1997, 137: 69~80.
- [5] Kvenvolden K A. A primer on the geological occurrence of gas hydrate [A]. *Gas hydrates: relevance to world margin stability and climatic change* [C]. [s. l.]: First Master Workshop, 1993. 39~80.
- [6] Lee M W, Hutchinson D R, Agena W F, et al. Seismic character of gas hydrate on the south eastern U. S. continental margin [J]. *Marine Geophysical Researches*, 1994, 16: 163~184.
- [7] Andreassen K, Hart P E, MacKay M. Amplitude versus offset modeling of the bottom simulating reflection associated with submarine gas hydrates [J]. *Marine Geology*, 1997, 137: 25~40.
- [8] Scholl D W, Hart P E. Velocity and amplitude structures on seismic-reflection profiles — possible massive gas-hydrate deposits and underlying gas accumulations in the Bering Sea basin [R]. U S Geological Survey Professional Paper 1570, 1997: 331~351.
- [9] 陈一鸣,朱德怀,任康,等.矿场地球物理测井技术测井资料解释[M].北京:石油工业出版社,1994.
- [10] Kastner M, Kvenvolden K A, Lorenson T D. Chemistry, isotope composition, and origin of a methane-hydrogen sulfide hydrate at the Cascadia subduction zone [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156: 173~183.

INDIRECT INDICATORS OF GAS HYDRATE OCCURRENCE WITHIN SUBMARINE SEDIMENTS

Zhao Xingmin¹ Wu Bihao¹ Wang Yaping² Lu Zhenquan¹

(1. *Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Testing Institute, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: Gas hydrate, a kind of new-type energy resources discovered over the past ten years, has aroused much attention from many countries around the globe, because of the very important role the gas hydrate has played in energy resource exploration, submarine geo-hazards prevention, and change in global climate. This kind of compounds usually exists within the sediments from the continental margins and also within the permafrosts of the polar areas, but the amount of gas hydrates occurring in the continental margins exceeds 90% of the total amount of gas hydrates existing in the whole world. In this case, this paper presents a detailed discussion on the indirect indicators of gas hydrate occurrence within submarine sediments, for the purpose of rapid and accurate determination of the distribution of this kind of compounds without the sediment sampling or without the hydrate samples collected.

Key words: gas hydrate; identification indicator; marine geology.