

应用地质

天然气水合物勘探开发技术研究进展

周怀阳¹, 彭晓彤², 叶 瑛²

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 浙江大学地球科学系, 杭州 310027)

[摘要] 天然气水合物是一种具有巨大潜在开发价值的海洋新型能源矿产。近 30 年来, 各国相继开展了海洋天然气水合物的勘探和开发技术的研究, 天然气水合物的勘探技术日趋成熟, 而开发技术基本上还都处于实验阶段。与国外正在形成的天然气水合物研究热潮相比, 我国对天然气水合物研究尚处于起步阶段。

[关键词] 天然气水合物 勘探技术 开发技术

[中图分类号] P618.13 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2002)01-0070-04

天然气水合物是一种海洋中开发潜力极大的新型能源矿产^[3,6,11,14]。它是由水分子和碳氢气体分子(如 CH₄ 等)组成的结晶状固态简单化合物。世界各大洋中天然气水合物的总量相当于全世界已知煤炭、石油和天然气等能源总储量的两倍, 因其分布广、规模大、勘探费用低, 正日益显示出巨大的商业价值。它是一种可能成为 21 世纪替代煤、石油、天然气的新型能源矿产。

天然气水合物具有潜在的战略意义和可观的经济效益, 从 20 世纪 80 年代初起, 美、英、德、加、日、印等科技发达国家便相继开展了本土和国际海底的调查研究与评价。至今, 各国已经对天然气水合物勘探开发技术等方面所进行的一系列深入细致的工作, 取得了大量令人鼓舞的成果。但与国外正在形成的天然气水合物研究热潮相比, 我国的天然气水合物研究基本上还处于起步阶段。特别是 90 年代以前, 我国科学家对天然气水合物的研究可以说几乎是空白。这与我国作为海洋大国和能源消耗大国的地位是极不相称的。因此开展对天然气水合物的研究工作并建立我国海底天然气水合物资源勘探开发的高新技术体系已成为我国资源和环境研究领域的当务之急。

1 海底天然气水合物勘探技术

天然气水合物的勘探技术正朝着多样化方向发展, 地球物理勘探和地球化学勘探技术日趋成熟, 各种新的勘探技术也不断出现, 对查明全球天然气水合物的分布和储量发挥着重要作用。

1) 地震勘探法 地震勘探是目前天然气水合物勘探最常用的、也是最为重要的天然气水合物普查方法。地震方法的原理是利用不同地层中地震反射波速率的差异进行天然气水合物层的探测。由于声波在天然气水合物中的传播速率比较高, 是一般海底沉积物的两倍(大约为 3.3 km/s), 故能够利用地震波反射资料检测到大面积分布的天然气水合物。

天然气水合物存在的一个重要地震剖面特征是具有因天然气水合物胶结地层造成的速率差异而显示的“底部模拟反射层”(BSR)^[5,7,8,13,15,17,19]。因为天然气水合物稳定带之下的沉积物中经常渗透有一定量的水, 同时还包含受上层天然气水合物层所屏蔽的气体, 而地震波在水和气中的传输速率都较低(水中的速率大约为 1.5 km/s), 故地震波在天然气水合物稳定带以下层中的速率也相应比较低。天然气水合物稳定带和天然气水合物稳定带之下地震波速率的明显差异产生了一个比较强的反射面(R)。同时, 由于天然气水合物稳定带的基底在一定的区域内总是出现在大致统一的深度, 故来自于这个带的正常地震波反射也大致平行于海底(因此称做“底部模拟”)。目前, 在秘鲁海槽、中美洲海槽、北加利福尼亚和俄勒冈滨外、南海海槽以及南极大陆和贝加尔湖都发现了 BSR 的存在。同时通过深海钻探已证明这些具有 BSR 的地层确实存在天然气水合物。

天然气水合物胶结带另一个重要的地震特征被称做“亮点”(blanking)。“亮点”是地震波强反射的标志。它也是由于天然气水合物胶结体的存在造成

[收稿日期] 2001-11-20; [修订日期] 2001-12-01; [责任编辑] 余大良。

[第一作者简介] 周怀阳(1961年-), 男, 研究员, 1982年毕业于南京大学, 1988年获博士学位, 在矿床成因、海洋地球化学、海洋环境等方面有一定的研究积累。

的。天然气水合物的胶结作用使地震波在天然气水合物胶结带上的反射变弱,产生明显的速度—振幅异常,从而在地震剖面上形成“亮点”,其长度可达到1~2 km,呈弯曲状与下伏层位相衔接。“亮点”也是天然气水合物存在的有效指示。

一般来说,在BSR之上通常为天然气水合物稳定带,而BSR以下是否存在游离气体至今尚未有定论。关于天然气水合物形成和BSR发育有多种不同观点,可归结为以下两种模式。第一种模式^[11]认为形成天然气水合物的甲烷是由天然气水合物稳定带内的有机质在微生物作用下形成的,故在整个天然气水合物稳定带中均存在天然气水合物,而在BSR之下,游离气体可能存在也可能不存在。另一种模式^[8]则认为甲烷大部分是在稳定带以下的深部经微生物作用下形成后向上迁移,故天然气水合物应聚集在稳定带的底部,该模式也同样无法预测BSR之下是否存在游离气体。

2) 地球物理测井法 地球物理测井法是根据地球物理资料来提取钻孔剖面中可能含有的天然气水合物带的物理特征。其方法包括井径、伽玛射线、自然电位、声波和中子孔隙度等测井方法^[10]。早在60~70年代,这种方法就用来预测北极大陆永久冻土区内油气田钻孔剖面中的天然气水合物富集带。目前已成功应用于极地和深海天然气水合物的勘探中。相对于周围沉积物,天然气水合物带的物理特征通常表现为声波速率、电阻率、孔径测定值增大以及密度测井读数减少等特点^[2,16],因此在众多测井曲线中,电阻测井和声速测井特征曲线最为有用,但这种测井方法对天然气水合物含量不大的粉砂—粘土质沉积区分效果不明显。地球物理测井法与地震勘探法联用,将可能成为今后全球范围内天然气水合物资源勘探和评价的关键。

3) 地球化学方法 在目前技术条件下,利用地球化学方法勘探天然气水合物的主要标志包括含天然气水合物沉积中孔隙水氯度或盐度的降低,以及水的氧化—还原电位、硫酸盐含量较低和氧同位素的变化等^[4,9,11]。1981年,Hesse首次发现含天然气水合物孔隙水样品中含氯量随深度增大而减小,自此,氯度降低开始作为预示着天然气水合物存在的标志^[4]。随后ODP第112航次,DSDP第76、第84航次在天然气水合物富集区域均采集到含氯量远远低于海水平均含氯量的样品^[12]。而在钻孔岩芯沉积物中所测得的孔隙水盐度降低这一标志并非天然气水合物存在的充分条件。孔隙水的淡化可能是由于天然气水合物分解所引起的,亦可能与天然气水合物分解毫无关系。甚至于在某些情况下,天然

气水合物的形成可使共生水的盐度升高。因此,在分析地球化学数据时应根据具体情况区别对待,综合考虑。

4) 标型矿物法 能指示天然气水合物存在的标型矿物通常是某些具有特定组成和形态的碳酸盐、硫酸盐和硫化物,它们是成矿流体在沉积作用、成岩作用以及后生作用过程中与海水、孔隙水、沉积物相互作用所形成的一系列标型矿物^[14]。例如,天然气水合物分解以后,碳酸盐会发生沉淀,此时这种碳酸盐就具有一种特殊的同位素地球化学特征,据此可判断天然气水合物的存在。同时,根据岩石中某些特征化石集合体,如Calypptogena属的软体动物的出现,也能从一个方面帮助判断天然气水合物的存在。

2 天然气水合物采样设备——保压取芯筒

在对天然气水合物进行勘探时,海底钻探是一种必不可少且行之有效的手段。80年代以前,科学家们主要是通过一般海底钻探来进行天然气水合物的勘探和研究。由于在获取和提升岩芯过程中没有采取保持天然气水合物贮存原始压力的措施,当钻孔岩芯提升到常温、常压的海面时,其中含有的天然气水合物可能全部或大部分分解了。这给判断天然气水合物是否存在或存在的数量并开展对天然气水合物的进一步研究带来了很大困难。在这种情况下,只能根据岩芯是否有温度变化、流态化、湿度增大以及孔隙水盐度降低等基本辅助标志来判断天然气水合物存在与否。

为了获取保持在原始压力条件下的沉积物岩芯,科学家们开始研制保压取芯筒(PCB)^[3,18,20]。希望在受控状态下使保持在原始压力下的天然气水合物样品发生分解,以供地球化学分析之用。同时,根据观察到的气压变化与化学组成判断天然气水合物的存在并研究天然气水合物的成因和来源。80年代前期,科学家们在美国布莱克海底高原DSDP503站位对保压取芯筒III型进行了现场试验,这标志着PCB-III型作为先进的海底钻探设备开始进入实际应用阶段。在此基础上,1995年11~12月,在布莱克海底高原,ODP第164航次首次系统全面地进行了使用保压取芯器(PCS)取样的尝试并取得了部分成功。该保压取芯器在海底以下0~400 m深度范围内以及较低的沉积物固结程度条件下所获得的取芯效果是令人满意的。但是当超过400 m深度或沉积层固结程度较高时,使用这种类型的保压取芯器进行取芯的效果并不理想。

随着对天然气水合物研究的深入,保压取芯器

也不断完善和发展。目前,研究人员针对海底沉积物的不同类型设计了 3 种类型的保压取芯器:

1) 推进型保压取芯器 适用于对粘土质含天然气水合物沉积层进行穿透和取芯。ODP 第 164 航次在布莱克海底高原沉积物上部 100 ~ 200 m 曾遇到这种沉积类型。

2) 旋转型保压取芯器 具旋转钻进和切割功能,适于对较深层位和比粘土质更坚硬、固结程度更高的含天然气水合物沉积层进行取芯。

3) 撞击型保压取芯器 具有摆动锤和撞击功能,适于对坚硬的、固结程度很好的颗粒石英砂岩层、硬砂岩层和卵石层等一些被认为是极难取芯的层位进行取芯。

1997 年开始的欧盟海洋科技计划(MAST)所研制的天然气水合物保压取芯器性能与以前的相比有较大的提高。它与其他相关设备一起构成了一个完善的天然气水合物保压取芯系统(HYACE)。为开展地球科学、环境科学和海洋资源的研究提供了有效而实用的手段。以下为该系统所能完成的部分研究工作及可测得的各种参数:

1) 天然气水合物的产状、规模、大小和性质。所涉及的参数包括密度、孔隙度、渗透性、盐度、气体和水的含量、矿物、压力和温度、孔隙水压力等。

2) 天然气水合物的成因、气体成分和碳同位素成分。

3) 地球物理方面:底部模拟反射层及其特征、声学阻抗、气体在 BSR 层内以及 BSR 层上下的富集、BSR 和天然气水合物层的深度关系。

土工方面:沉积物中天然气水合物的稳定性、剪切强度、滑坡可能性。

4) 相的稳定性、沉积物和海水中气体的溶解度、再吸附作用。

5) 天然气水合物附近和内部微生物活动及其对天然气水合物形成和分解的作用。

值得一提的是,随着科技的不断发展,各种针对天然气水合物勘探的新技术、新方法不断涌现,而综合利用各种勘探技术已成为目前进行天然气水合物勘探的常用方法。

3 天然气水合物的开发技术

由于天然气水合物的开发面临着经济上和技术上可行性问题,天然气水合物开发技术尚处于实验阶段,唯一的工业开采(俄罗斯 Messoyka 天然气水合物气田)也仅位于极地永久冻土带^[14],海底天然气水合物的开发至今只是概念上的模式。目前大多

数有关天然气水合物开发的思路基本上都是首先考虑如何将蕴藏于沉积物中的天然气水合物进行分解,然后加以利用。由于天然气水合物稳定带(HSZ)的形成需要一定的温度压力条件(温度 0 ~ 10 °C 以下,压力 10 MPa 以上)^[11],人为的打破这种平衡,造成天然气水合物的分解,是目前开发天然气水合物中甲烷资源的主要方法^[1,6,14,19]。综合各国天然气水合物开发方法,大体可归为以下 3 类。

1) 热激发法 热激发法是利用钻探技术在天然气水合物稳定层中安装管道,对含天然气水合物的地层进行加热,提高局部储层温度,破坏水合物中的氢链,从而造成天然气水合物分解。该方法可进一步细分为热水注入法和蒸气注入法,前者由于比后者消耗能量少,也不需要考虑稀释问题,从而降低了开发费用。

2) 减压法 减压法是通过降低天然气水合物沉积压力来促使天然气水合物分解。与热激发法相比,该法无热量消耗和损失,可行性较高。减压法更适合于大规模的天然气水合物开发。

3) 阻凝剂法 通过注入阻凝剂(如甲醇等)以改变储层温—压平衡,造成部分天然气水合物的分解,改变天然气水合物稳定层的温压条件,使该层位的天然气水合物不再稳定。该方法的缺陷是造价相当昂贵。

前苏联科学家对海底天然气水合物和下伏游离气共生区天然气水合物的开采技术提出了更为简单实用的设想,即首先开采下伏游离气体,随着游离气体的不断减少,天然气水合物与气之间的平衡不断受到破坏,使得天然气水合物层开始融化并产出气体不断补充到下伏的游离气气库中,直到天然气水合物开采完为止。

除了以上常见的开发思路之外,根据有关研究结果,可能还有另一种利用天然气水合物生产能源的方法。科学家们指出,对于在深海中的传统气体矿床通过钻井手段获取应该是可行的,但是因为大陆斜坡的不稳定和需要铺设的管道又很长等原因所产生的技术和经济方面的问题,有可能使得人们难以利用这种手段来利用天然气水合物资源。更重要的是,管道在冰冷的深海中易于形成管塞。所以,他们试图在不使天然气水合物分解的情况下(即不用管道),把天然气水合物运送到陆地上来。一个新的天然气水合物开发方法是在深海中使天然气水合物颗粒化,或将天然气水合物装入一种可膨胀的软式气袋(其内部保持天然气水合物稳定所需的温压条件)中,再用潜水艇把天然气水合物拖到大陆架附近的浅水地区,在那里,天然气水合物能够缓慢地分

解,产出燃料和水。或许今后能研制出一种添加剂,使天然气水合物在较低的压力和较高的温度下能够稳定。如果能做到这些,天然气水合物在传统的船舶上运输起来可能比液化的天然气还要安全。

4 结语

国际上天然气水合物应用性研究的竞赛实际上已经拉开帷幕,天然气水合物勘探技术正日趋完善,地球物理测井法与地震勘探法联用将有可能成为今后一段时期全球范围内天然气水合物资源勘探和评价的关键,同时保压取芯系统的研制进一步为系统全面地研究天然气水合物提供了有效而实用的手段。但是,如何把天然气水合物作为能源使用,特别是如何解决天然气水合物的低成本开发技术问题,在目前阶段仍是最难克服的障碍。现在这方面的研究基本上还处于实验阶段,减压法只是其中一种相对可行性较高的开采方法,至今还没有一个安全、有效、能够大规模地开采天然气水合物的方法,这方面的工作有待于人们更积极、更深入地去开展。

[参考文献]

- [1] Bishnoi P R, Natarajan V. formation and decomposition of gas hydrates[J]. Fluid Phase Equilibria, 1996,117:168 ~ 177.
- [2] Collett T S, Bird K J, Kvenvolden K A, Magoon L B. Geologic interrelations relative to gas hydrates within the North Slope of Alaska[J], U. S. Geol. Sur v. Open File Rep, 1988,389:150.
- [3] Gerald R D, Paull C K, Wallace P. Direct measurement of in situ methane quantities in a large gas - hydrate reservoir[J]. Nature, 1997,385:462 ~ 428.
- [4] Hesse R, Harrison W E. Gas Hydrates (clathrates) causing pore - water freshening and oxygen isotope fractionation in deep - water sedimentary sections of terrigenous continental margins[J]. Earth Planet. Sci. Lett, 1981,11:453 ~ 562.
- [5] Holbrook W S, Hoskins H, Wood W T, Stephen R A, Lizzaralde D. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling[J], Science, 1996:273,1840 ~ 1843.
- [6] Holder G D, Kamath V A, Godbole S P. The Potential of natural gas hydrates as an energy resource[J]. Ann. Rev. Energy, 1984,9:427 ~ 445.
- [7] Hyndman R D, Davis E E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom - simulating reflectors by vertical fluid expulsion[J]. J. Geophys. Res, 1992, 97(B5):7025 ~ 7041.
- [8] Hyndman R D, Spence G D. A seismic of methane hydrate marine bottom simulating reflectors[J]. J. Geophys. Res. 1992,97:6683 ~ 6698.
- [9] Hyndman R D, Yuan T, Moran K. The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999,172:167 ~ 177.
- [10] Kvenvolden K A, Grantz A. Gas hydrates of the Arctic Ocean region[A], in The Geology of North America, The Arctic Ocean Region, edited by A. Grantz, L. Johnson, and J. F. Sweeney, L:539 ~ 549, Geological Society of America, Boulder, Colo., 1990.
- [11] Kvenvolden K A, Barnard L A. Hydrates of natural gas in continental margins[A]. in Studies in Continental Margin Geology, edited by J. S. Watkins and C. L. Dralx, Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., 34:631 ~ 640,1983.
- [12] Kvenvolden K A, Kastner M. Gas Hydrates of the peruvian outer continental margin[A], in Proceedings of Ocean Drilling Program[A], Scientific Results, edited by E. Suess et al., 112:517 ~ 526, Ocean Drilling Program, College Station, Tex., 1990.
- [13] Lee M W, Hutchinson D R, Agena W F et al. Seismic character of gas hydrates on the southeastern U. S continental margin[J]. Mar. Geophys. Res, 1994, 16:163 ~ 184.
- [14] Makogon Y F. Hydrates of Natural Gas[M]. Pennwell, Tulsa, Okla., 1981.
- [15] McGee T M. A single - channel seismic reflection method for quantifying lateral variations in BSR reflectivity[J], Marine Geology, 2000,164:29 ~ 35.
- [16] Methews M. Logging characteristics of methane hydrates[J]. Log Anal, 1986:27(3),26 ~ 63.
- [17] Miller J J, Lee M W, Huene R von. A analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone, offshore Peru[J], AAPG Bull. 1982,66:789 ~ 792.
- [18] Paull C K. (1997) Drilling for gas hydrates: Ocean Drilling Program Leg164[C]. Proceedings of the Offshore Technology Conference, 5 ~ 8 May. Houston, TX, OTC Paper 8294, 1 ~ 8.
- [19] Pecher I A, Ranero C R, Huene R von, Minshull T A, Singh S C. The nature and distribution of bottom simulating reflectors at the Costa Rican convergent margin[J]. Geophys. J. Int., 1998,133:219 ~ 229.
- [20] Pettigrew T L. Design and Operation of a Wireline Pressure Core Sample(P CS)[A], Ocean Drilling Program, Texas A & M University, Technical Note 17, 1992.

DEVELOPMENT IN TECHNOLOGY OF PROSPECTING AND EXPLOITATION FOR GAS HYDRATES

ZHOU Huai - yang¹, PENG Xiao - tong², YE Ying²

(1. Institute of Geochemistry, National Institute of sciences, Guangzhou 510640;

2. Earth Science Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Gas hydrate is a new type of marine energy resource which has great potential exploitation value. In recent years, many countries except China have carried out researches on prospecting and exploitation technology for gas hydrates one after the other. The prospecting technology is gradually mature, but exploitation technology is still at the stage of experiment. Comparing with the related international high tide, the research of gas hydrates in China is still at the stage of beginning.

Key words: gas hydrate, prospecting technology, exploitation technology