

(¹ 浙江大学地球科学系 杭州 310027)

(² 国家海洋局海底科学重点实验室 杭州 310012)

方银霞^{1,2} 金翔龙² 杨树锋¹;

海底天然气水合物的研究进展*

PROGRESSION ON MARINE GAS HYDRATE STUDY

随着能源的日益紧张,非常规天然气中的天然气水合物,以其能量高、分布广、规模大等特点正崭露头角,有望成为 21 世纪的重要能源。天然气水合物 (Gas hydrate) 是天然气 (主要是甲烷) 和水分子组成的固体结晶物质。它存在于低温高压条件下,主要出现于 > 300 ~ 500 m 水深的海底沉积物中和寒冷的高纬度区域 (特别是永冻层地区)。据估计陆地上 20.7% 和大洋底 90% 的地区具有形成天然气水合物的有利条件。全世界水合物中的甲烷碳达 10^6 kg 或 20×10^5 m³ 的甲烷气,较常规天然气大 2~3 个数量级,而大部分水合物又分布在海洋,其资源量是陆地上的 100 倍以上。目前已在世界 14 个地区采集到水合物样品和 30 个地区获得其存在的地球物理和地球化学证据。海底水合物大都处于陆架边缘和陆坡上部,在法律上的大陆架和专属经济区内,属于海洋权益激烈争夺的区域。所以世界各国十分

瞩目海底天然气水合物的研究与开发,不仅把它当作 21 世纪具有商业开发前景的海洋能源,而且在战略上将其视为争夺海洋权益的重要因子。天然气水合物给人类带来了新的能源前景,但同时作为“温室气体”,对人类的生存环境也提出严峻的挑战,所以水合物的研究越来越引起世界各国的重视。

1 天然气水合物的物质组成

天然气水合物为一种冰状的白色固态结晶晶体,由水和气的立体结晶格架组成,气体中又以甲烷为主,占 99% 以上。在水合物晶体结构中大部分烃类气体和少量非烃类气体占据了水分子间各种大小不一的空腔,并主要以立方晶体结构 (I 型结构) 和菱形晶体结构 (II 型结构) 存在于自然界中。I 型结构在自然界中很常见。II 型结构首次在路易斯安那海湾斜坡 530 ~ 560 m 水深处用活塞取芯时得到,它含

丰富的热成因 C₁ ~ C₄ 烃类气体。1994 年在墨西哥湾的大陆斜坡又发现了以前仅在实验室中发现的六方晶体结构 (H 型结构) 水合物。

I 型结构水合物每 46 个水分子包含 8 个气分子,水气分子数之比为 5.75,晶格内部仅能容纳甲烷 (C₁)、乙烷 (C₂) 等小分子烃和 N₂, CO₂, H₂S 等非烃分子。II 型结构水合物每 136 个水分子包含 24 个气分子,水气分子数之比为 5.67,除了能包容 C₁, C₂ 等小分子外,还可容纳丙烷 (C₃), 异丁烷 (iC₄) 等较大的烃类气体分子。H 型结构水合物每 34 个水分子包含 6 个气分子,水气分子数之比为 5.67, H 型结构水合物比 I 型和 II 型结构水合物能包容更大的分子,除了 C₁ ~ C₄ 烃类气体,还包含一般的原油分子 iC₆ 和

* 国家海洋基金青年海洋科学基金资助项目 99509 号
收稿日期: 1999-07-20;
修回日期: 1999-08-20

其他大分子。

2 海底天然气水合物的成矿环境

如果热动力条件适合,当源于沉积物自身的生物成因的浅成气和热成因的深成气充满了沉积物孔隙,天然气水合物就可以形成并聚集在沉积物中,即水合物形成需要3个条件:(1)足够低的温度;(2)较高的压力;(3)原始物质——气和水的足够富集。天然气水合物的压力(深度)-温度稳定区间(图1)表明这些条件出现在大陆坡水深超过300~500 m到海底下一定深度处^[4]。几乎所有著名的海底天然气水合物都位于大陆斜坡、陆基和岛坡、岛基,而且通常均赋存在具有较厚和较年轻盖层的沉积盆地内,这与海洋沉积层和有关的有机质(烃类气体源)在海洋中环大陆分布有关。

在水合物稳定带,水合物尽可能地充填孔隙,自身形成一个无透性的盖层,并在其下部捕获大量的游离气。由于水合物岩层比较致密,所以对常规油气藏起到屏蔽作用,因而水合物层之下往往有大型的常规气藏存在。地震剖面中的拟海底反射层(Bottom simulated reflection)就源于水合物稳定区基底,是由含水合物和不含水合物沉积层界面引起的声阻抗反差。

随着沉积作用的进行和海底热液的活动,水合物稳定带的边界由于温压条件的改变也会发生变化,稳定的水合物变得不稳定,开始转变为气态,同时向上移动,并在一定温压条件下再次稳定化,形成新的水合物稳定带,所以沉积作用影响着水合物稳定带的向上位移,其

埋藏深度不会因为沉积物的堆积作用而加深。地温梯度是确定水合物稳定层深度及厚度最关键的参数,地震数据显示通常地温梯度较低、沉积物较厚的大陆边缘水合物稳定带深度较大。

3 海底天然气水合物的成矿作用

甲烷气有着广泛的来源,就成因而言可分为3类:生物成因气、热成因气和非生物成因气。生物成因气是由微生物在缺氧环境中分解有机物产生的。热成因气的形成方式与石油相似,深层有机质发生热解作用,其长链有机化合物断裂、分解形成天然气。非生物成因系指地球内部迄今仍保存的地球原始烃类气体,或地壳内部经无机化学过程产生的烃类气体。天然气水合物中的甲烷多数是当地生物活动产生的,但某些地区如墨西哥湾和 Caspian 海的甲烷是热成因的。对于生物甲烷的形成,必须具有 >30 m/Ma 的沉积速度, >0.5% 的有机碳和 >10 ml/L 的残留甲烷量。甲烷的形成是从海底之下一定深度开始,这一深度就是孔隙水疏

酸盐离子浓度降低的地方,该深度主要取决于沉降速率和沉积物中有机质的含量。

天然气水合物的成矿作用可分为两种:(1)静态系统成矿作用,即水合物形成的主要原因不是外来物质的供给,而是系统内的变化;(2)动态系统成矿作用,即外部向反应区的物质交换是水合物形成的直接原因^[1]。

在静态系统中,合适的热动力条件下,孔隙被气体充满的沉积物层,有可能因为温度下降通过冷却作用,或者通过挤压作用增大压力而形成天然气水合物。另外由于在地下成岩作用过程中气的丰度可以增大,所以在允许水合物保存的海底温压条件下,溶于孔隙水中的自生生物化学气的数量可增加到保持水合物形成的平衡压力的程度,使部分孔隙水变成水合物。

在动态系统中,渗流、分子扩散、流体化岩石流内的物质搬运和岩块迁移都可以与水合物带进行物质交换,导致气的富集。在渗流模式下,渗流流体(气和含气水)渗流进入水合物稳定带附近的孔隙和裂隙,由于水合物稳定带所处的

图1 天然气水合物的压力(深度)-温度稳定区间
(据 Max M.O. & Lowie A., 1996)

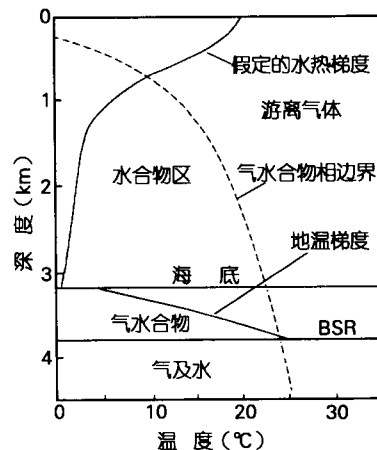
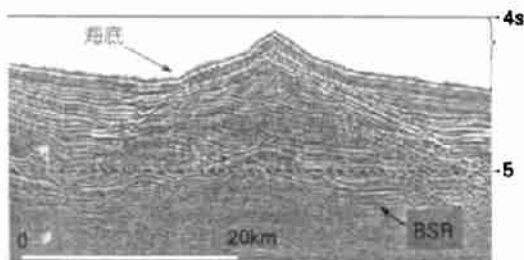


图2 地震剖面上的
拟海底反射层
(BSR)图像



大陆斜坡和陆基处的海水比大陆架处要冷,气在水中的溶解度就会降低,使渗流含气水呈气过饱和态,因而成为水合物的生成源,并可在储层内形成。天然气水合物一般都赋存在空隙、裂隙或较渗透的层位里,说明水合物是由运动着的流体形成的。在黑海和里海的水底泥火山岩堆积中发现了12 cm长的和其他水合物不同形状,呈亚等轴状、层状、小针状的水合物包体,估计就是流体在裂隙中渗流时形成的^[1]。分子扩散则在孔隙水达到烃饱和临界条件,且存在有溶解梯度引起的浓度梯度时,对烃的初次运移和初次聚集起一定作用。在水合物形成带不仅有流体的渗流,而且还有流体化岩石的运动。大陆斜坡广泛出现的沉积物质的重力位移动过程中,孔隙里或堆积物中含游离气的岩体,在由斜坡向下移动时由于温压条件的改变,游离气就会释放出来集成气流,在合适的温压条件下达到过饱和状态而形成水合物。

4 海底天然气水合物的勘探方法

天然气水合物可以粘结碎屑颗粒,降低沉积物孔隙度,它的存在改变了沉积物的地球物理性质,使

水合物层具有低热导率、低导电率、低密度和地震波传播速度大等特点,特别是水合物的声速比沉积物大得多,所以多道地震反射法是海底天然气水合物主要的勘探方法,主要根据地震剖面上的拟海底反射层(BSR)来识别水合物的存在。BSR是含水合物的沉积物和不含水合物沉积物之间的声阻抗反差界面,因而可以指示天然气水合物的存在和深度分布特征。在地震剖面上,BSR一般呈高振幅、负极性、平行于海底和与沉积构造相交的特性,极易识别^[1](图2)。

拟海底反射层与水合物的关系主要由其与水合物的压力-温度稳定区的理论底界相一致推测而来。但是现在Nathan等人认为水合物的量不足以在含水合物和无水合物沉积界面上产生大的阻抗差,而且BSR的波形是由一个层而不是一个单独的界面产生的。在智利三岔点附近海岸ODP Leg 141的859号钻孔穿过了BSR,它的地球物理测井显示在BSR之上的两个层段(A和D)的孔隙中含有水合物(图3)^[1],A层和D层的纵波波速分别为1900 m/s和1950 m/s,比没有水合物的C层高50 m/s左右,它们各含大约10%和18%的水合物。而BSR则产生于7 m厚的E层之顶、底部物理性质的反差,E层纵

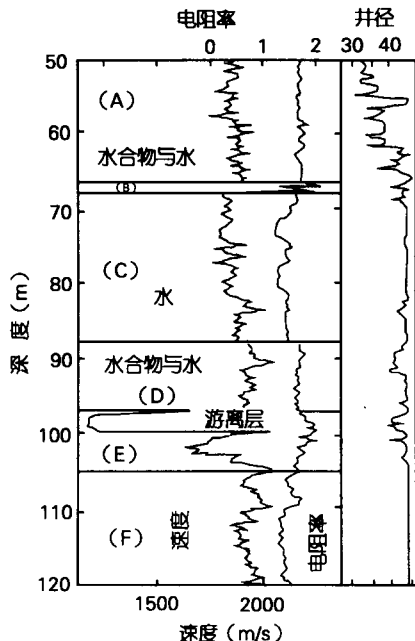
波波速下降到1600 m/s,是一个低速异常区,在E层底部波速又增大了与E层顶部相似的值,这表明BSR是由7 m厚的含游离气的低速层引起的。BSR的振幅与气体含量及含气层厚度有直接关系,但振幅不是水合物含量的直接证据,因为叠加干涉可加长BSR的振幅。

虽然可以利用地震剖面上BSR特征来确定天然气水合物的底界,但是其上界面却不能从地震反射剖面图上明确界定,所以水合物的总体积和它作为资源的价值也不能直接从这些数据获得,还需要结合其他的地球物理勘探手段,譬如高分辨率并壁磁学、重力学参数测量、海底瞬时双偶极法等,当然利用直接测定技术对天然气水合物进行实地直接测量也是必需的。

5 海底天然气水合物的环境效应

天然气水合物固然是人类未来的一种重要能源,它给人类带来了能源前景,但同时对生存环境的维护也提出了严重的挑战。天然气水合物中的甲烷,其温室效应为CO₂温室效应的20倍,而温室效应造成的异常气候和海面上升正威胁着人类的生存。当前大气中的CO₂气是以每年0.3%的速率在增加,而大气中的甲烷气却是以每年0.9%的速率在迅速增加。世界上海底天然气水合物中的甲烷总量约为地球大气中甲烷容量的3000倍。若稍有不慎,让水合物中的甲烷气逃逸到大气中,将产生无法想象的灾难性后果。而且固结在海底沉积物中的水合物,一旦条件发生变化使甲烷气释出,还会改变海底沉积物的物理性质,极大地降低沉

图3 穿过BSR的859号钻井剖面
 (据 Nathan L. B. Bangs 等人, 1997)



积物的工程力学特性, 使海底软化, 出现大规模的海底滑坡, 从而毁坏海底工程设施, 如海底输电通

讯电缆、海洋石油钻井平台等。

5 结语

天然气水合物的研究可望解

决人类未来能源的出路问题, 所以近 10 a 来俄、美、日、德等许多国家都对天然气水合物的研究给予了高度的重视, 形成了国际地质学研究的一个热点及前沿领域。对于我国这样一个能源缺乏、海域广阔的国家更应加大研究力度, 在水合物的成矿与分布规律、成因与演化机制、资源评价以及与全球气候变化的关系等方面进行重点研究, 尽快为我国的经济社会发展服务。

主要参考文献

- 1 史斗译。天然气地球科学, 1998, 9(3-4): 1~8
- 2 史斗译。天然气地球科学, 1998, 9(3-4): 54~56
- 3 王万春译。天然气地球科学, 1998, 9(3-4): 61~65
- 4 Max M.O. & Lowrie A. . *Petroleum Geology*, 1996, 19(1): 41~56
- 5 M. Hovland et al. . *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(3): 245~255

(本文编辑: 李本川)