

# 天然气水合物形成模式及其控制因素初探

陈永峒<sup>1,2</sup>, 刘 彬<sup>3</sup>, 朱建辉<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石化 江汉石油研究院, 湖北 潜江 433124; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡实验地质研究所, 江苏 无锡 214151)

**摘要:** 气水合物是天然气和水分子组成的固体结晶物质, 是水和以甲烷等为主的有机气体构成的可燃性物质, 主要存在于极地和海底温度很低的海域。气水合物的形成和存在有其严格的温度压力条件, 一切能影响到气水合物的压力和温度的地质因素就是控制气水合物形成和存在的因素。该文利用国内外已有资料总结归纳气水合物的成藏模式, 并通过分析指出了气水合物存在的控制因素, 希望它能对加速发现气水合物提供一些有益的线索。

**关键词:** 控制因素; 形成模式; 气水合物

**中图分类号:** TE122. 1

**文献标识码:** A

气水合物是天然气和水分子组成的固体结晶物质, 是水和以甲烷等为主的有机气体构成的可燃性物质, 主要存在于极地和海底温度很低的海域。据估计, 在陆上和深海地区分别有  $10^{13} \text{m}^3$  和  $20 \times 10^{15} \text{m}^3$  储量(标准状况下), 有望成为 21 世纪全球重要接替性能源。

我国既有  $470 \times 10^4 \text{km}^2$  辽阔的海疆<sup>[1]</sup>, 又有  $240 \times 10^4 \text{km}^2$  号称世界“第三极”的青藏高原<sup>[2]</sup>。2000 年调查业已表明, 西沙海槽存在数量可观的气水合物。而西沙海槽只是我国海域的极小部分, 如此巨大的海疆和如此辽阔的青藏高原必定蕴藏着更加巨大的气水合物资源。如何快速寻找这一巨大的气水合物资源, 已成为我国地质工作者一项十分重要而又迫切的任务。因此, 利用国内外已有资料来总结归纳出一套成藏模式, 无疑对加速发现气水合物具有十分重要的理论及现实意义。

当前, 国内外对气水合物的成藏模式研究得较少, 而对该问题的回答又是寻找气水合物所不可回避的。因而, 利用国内外已有资料来总结归纳出一套成藏模式, 显得尤为重要。本文试图从成藏模式的相关方面去分析、尝试, 文字可能粗糙、肤浅, 但旨在提出一些思路, 希望能起到抛砖引玉之功效。

大量资料证明, 气水合物主要分布于: a) 极地和海底温度很低的海域(外大陆边缘和岛屿边缘的滨

外沉积物, 水深超过 300~ 500m 的海域); b) 主要存在于碎屑岩中, 目前尚无碳酸盐岩中发现气水合物的报道。

## 1 气水合物形成条件

气水合物的形成需要一定的条件, 总的说来必需满足物质条件和理化条件。物质条件包括含有甲烷气的天然气、能储集气水合物的储集空间、能封闭气水合物的盖层; 理化条件包括气水合物形成必需的温压条件。

### 1.1 天然气来源

与油气藏成藏一样, 气水合物的形成同样需要甲烷气气源。总的说来, 天然气主要来源于微生物甲烷气<sup>[1,2]</sup>、热解甲烷气<sup>[3,4]</sup>和煤成气。

### 1.2 储集条件

现代沉积物中的气水合物, 主要产出于粒度较粗、孔隙度较大的软性未固结沉积物中, 如含砂软泥。在中美洲海槽 DSDP570 站位中发现气水合物的沉积物粒度要比上下层位未出现气水合物的沉积物粒度大得多, 砂、粉砂粒级的含量也大得多。

就沉积物时代而言, 大多数含气水合物的软性未固结沉积物为中新世以来的地层。如 ODP 在 Black 海脊 997 孔取得的气水合物分布于上新世地

层;而一些通过构造裂隙或盐底辟构造部位渗出的气水合物可分布在全新世地层,如德国太阳号在东太平洋气水合物海岭和大洋钻探在 Black 海脊 996 站位取得的气水合物样品。

到目前为止,发现最老的地层当属北极地区,如美国 Prudhoe 湾—Kuparuk 河地区,气水合物仅产于白垩和第三系的 Sagavanirktok 组。该组为一套浅海陆棚相和三角洲平原相沉积,由砂岩、页岩和砾岩组成。再如俄罗斯西西伯利亚盆地 Messoyakha 气田,气水合物主要产于早白垩 Vartov、Megion 组以及晚白垩 Pokur 组储层。Pokur 组是海退时期沉积的海相和非海相砂页岩互层,非海相地层中煤和植物碎屑也十分发育。这两个地区的气水合物分布具有一些共同特点即高孔隙度和低含水饱和度的脆性砂岩储层内。

如何才能形成这种储层呢?一个最理想的条件就是沉积速率较高。这是因为 a) 沉积速率高的粗碎屑沉积区可形成高的孔隙度和良好的流体输导体系,有利于气水合物的形成; b) 易于形成异常高压区,而异常高压区的存在也有利于气水合物的形成。西太平洋美国大陆边缘中的 4 个气水合物聚集区内,有 3 个与快速沉积区有关,其中 Black 海岭晚渐新世至全新世沉积物沉积速率达  $160\sim 190\text{m}/\text{Ma}^{[5]}$ 。究其原因,大多数海洋气水合物为生物甲烷气,在快速沉积的半深海沉积区聚积了大量的有机碎屑物,由于迅速埋藏在海底未遭受氧化作用而保存下来,并在沉积物中经细菌作用转变为大量的甲烷<sup>[6]</sup>。

满足这种条件的沉积环境有: a) 三角洲地区,如加拿大西北的 Mackenzie 三角洲前缘的气水合物;美国 Prudhoe 湾—Kuparuk 河地区;我国南海西沙海槽等。这些地区沉积速率高,储层物性好。 b) 沉积速率较高的陆棚区,如上述的美国 Prudhoe 湾—Kuparuk 河地区。 c) 浊积扇、斜坡扇等突发事件沉积体,沉积速率大,可以成为气水合物聚集的有利区。

### 1.3 盖层条件

从气水合物作为一种“累赘”发现于输气管内<sup>[7]</sup>才引起石油界的注意来看,盖层对它的形成关系似乎不大。但盖层的存在更利于形成气水合物,因为如果深部热解气顺通道(断层或不整合面)上移,遇到盖层,就近聚集,一旦温度、压力条件成熟时就可形成气水合物。

### 1.4 理化条件

气水合物的形成除了具备以上条件外,还应具备一定的理化条件,即温度、压力以及孔隙水的组成。研究表明<sup>[6]</sup>,自然界中气水合物的产出严格受

温度、压力和水合物组成的控制,如果将这种条件转换成地质条件,则在极地的陆上地区(地表温度低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),甲烷水合物存在的深度上限大约在  $150\text{m}$  处;在大洋沉积物中,气水合物产出底水温度接近  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水深超过  $300\text{m}$  的地方。沉积物中水合物存在的深度下界取决于地温梯度,其最大深度在沉积物固体表面之下  $2\ 000\text{m}$  左右(视当地地温条件而定,一般要小于此深度),因此,气水合物的分布仅局限于岩石圈浅部。

## 2 气水合物成藏模式

通常认为气水合物的甲烷主要来源于生物甲烷、深部热解甲烷以及煤成甲烷。根据气水合物形成过程则可以分成两类模式,一类是生物甲烷成因模式,其特点是气源为生物甲烷,气水合物的形成过程相对较“慢”;另一类是热解甲烷成因模式,其特点是气源多样,形成过程有“快”有“慢”。

### 2.1 生物甲烷成因模式

这类模式的共同特点是甲烷气为生物成因的。只是形成时间有早晚之分。这两种模式一般为海底气水合物形成的模式。

#### 2.1.1 浅部生物甲烷气模式

该模式假定甲烷是气水合物稳定带内的有机质经生物作用形成的<sup>[8]</sup>,气水合物的生成与沉积作用同时发生。

假定甲烷是气水合物稳定带内的有机质经生物作用形成的,即认为甲烷气的生成地与其储存地都为同一地层。有机质埋深达一定深度后,经厌氧细菌的作用,生成生物甲烷和少量高分子烃。这些烃类气体,如果理化条件合适,会形成气水合物。南里海与泥火山有关<sup>[8]</sup>的气水合物及美国 Blake 海岭中的气水合物均属于此类。

随着气水合物稳定带的变厚与加深,它的底部最终会达到一个气水合物不能稳定存在的温度区间,在此出现游离气。但如果合适的通道,这些游离气可以运移到上覆气水合物稳定带中<sup>[9]</sup>。按照这个模式,整个气水合物稳定带内都应有气水合物生成,而其下是否存在游离气则不确定。

#### 2.1.2 深成生物甲烷气模式

该模式假定,气水合物的甲烷是深部来源的,即是由上升流体从深部进入气水合物稳定带时分离出来的甲烷形成的<sup>[10]</sup>。

这里假定大多数甲烷是在气水合物稳定带的下方,不足以形成热解甲烷的深处经微生物作用形成

的。按照这个模式,气水合物应集中在 BSR 附近和气水合物稳定带的底部,BSR 下方不会有游离气存在。

如墨西哥的 Garden 滩和 Green 海底峡谷就属于此种类型。

当然气水合物的甲烷气可能来源于一种成因气,也可能同时兼具两种来源的成因气。

## 2.2 热解甲烷成因模式

这种模式假定甲烷是有机质受深部热力降解作用而形成的,甲烷可以来源于油田气或煤田气甚至是生物成因气。根据形成过程的“快慢”分成气藏速冻式和缓慢冷冻式。

### 2.2.1 气藏速冻式

它是假设原来的气藏(不为气水合物的干气或湿气藏)由于气候条件的变化,后期形成的气水合物。可以认为它是极地气水合物的形成模式。

这种模式是深部热解甲烷气(甲烷气可以是油田气或煤田气),通过一定途径(可以是断层、不整合面甚至是沿储层)业已形成气藏,这种气藏由于地质条件的变化(气候由间冰期到冰期),适合形成气水合物。

### 2.2.2 缓慢冷冻式

这种模式是深部热解甲烷气(甲烷气可以是油田气或煤田气),通过一定途径(可以是断层、不整合面甚至是沿储层)运移到气水合物带或适合于形成气水合物的海底,从而形成气水合物矿藏。这种模式可以为海域和极地气水合物的共同模式。

## 3 气水合物分布的控制因素

气水合物形成后,必须有适合它存在的地方。若在漫长的地史过程中,所处的环境发生了较大的改变,原来形成的气水合物有可能遭到破坏。

### 3.1 构造运动与地热史

构造运动对气水合物的影响是多方面的。a) 由于地壳下降,使气水合物的埋深增加,导致温度升高,引起气水合物溶解,使其遭受破坏;b) 若地壳上升幅度过大,地层遭受剥蚀,上覆压力减小,引起气水合物溶解,使其遭受破坏;c) 地壳运动易形成断层,如果断穿气水合物带,由于游离气的减少,导致地层压力降低,引起气水合物溶解,使其遭受破坏;d) 强烈的构造运动常伴随岩浆活动,大量的岩浆上涌,使地温升高,引起气水合物溶解,使其遭受破坏。

一般说来,地热与构造运动关系较密切,构造活动早—中期,地温梯度高,末期地温梯度低;此外地

热与地壳的厚度有关,一般地壳厚度越大,地温梯度越低;地壳厚度越小,地温梯度越高。地温梯度越低,越有利于气水合物的形成与保存。

### 3.2 全球海平面变化

据陈萍等人的研究<sup>[11]</sup>,海平面升降直接引起海底静水压力的变化,且不同水深的水底温度亦有差异。研究表明,如果下降幅度较小,下降后海底静水压力仍大于水合物稳定压力,则对水合物稳定无影响;若下降幅度较大,下降后海底静水压力小于水合物稳定压力,则引起水合物分解。William P. Dillon 等人研究<sup>[12]</sup>,海平面降低 120m,将使气水合物的底部(BSR)抬升约 20m,其结果会使得气水合物溶解并引起洋底滑塌。

### 3.3 全球气温的变化

在极地、高纬度以及中低纬度地区,冰期与间冰期对气水合物的影响较大。中低纬度地区,冰期带来的效应是海平面下降的同时海底温度降低;而间冰期带来的效应是海平面上升的同时水温升高。气水合物的存在与否主要取决于海平面升降的幅度。如果冰期海平面迅速大幅度下降,大陆斜坡地带的气水合物很快会因上覆水压的突然降低而分解<sup>[11]</sup>。而对于类似于青藏高原的地区,冰期有利于气水合物的保存,间冰期则不利于气水合物的保存。

极地和高纬地区,冰期能产生 3 方面的影响。a) 冰层加厚增大了冰体下覆沉积物的压力,因此增加了气水合物的稳定性;b) 冰体下的温度大约 0~2℃,降低了沉积物的温度,也增加了气水合物稳定性;c) 冰的渗透性相当低,将沉积物中逸出的气体捕获在冰体之下,使得更多的烃类气体富集,有利于气水合物的形成。如,一些作者认为<sup>[13-15]</sup>,西西伯利亚盆地北部早上新世以来(约 1.65Ma),一直存在着有利于永冻层和气水合物形成的条件,俄罗斯地质家通常推断,早先存在的游离气在全新世冰期已转变为气水合物,而气水合物在后来的间冰期又重新转变为游离气藏,Messoyakha 气田正处在这一阶段。相反,由于间冰期气候温暖,冰体消融,上覆压力降低,温度上升,如果冰体消融速度快,压力降低、温度升高迅速的话,气水合物将快速或“爆炸式”分解。如在靠近北极的巴伦支海海底表面分布有大量的“凹坑”,很可能是由表层约 3km 厚的冰体消失后,造成海底气水合物的“爆炸式”分解而留下的地貌特征<sup>[16]</sup>。

### 3.4 底辟和块体运动

Dillon WP 等人(1983)研究<sup>[17]</sup>发现,底辟构造对气水合物的形成和保存起到的作用是双重性的。一

方面,由于底辟的形成,为气水合物的形成提供了圈闭,创造了条件;另一方面,底辟构造可以引起地热异常和化学异常,因而可以造成在底辟构造周围,气水合物数量减少和气水合物胶结层减薄。

块体运动对气水合物的影响可能主要是引起水合物胶结层的结构和水合物的丰度<sup>[12]</sup>。由于块体运动象一块岩化岩石将上覆岩层搬走而降低了沉积物压力,因此,在BSR处的压力应当降低,临近其相界的水合物发生分解;另一方面,由于水合物的分解引起岩石结构强度变低,使岩层滑塌,其结果进一步将引起水合物的分解。

## 4 结论

a) 形成气水合物需要含甲烷气的天然气源。目前认为天然气来源有浅层微生物和深层热解甲烷气以及煤成气3种。

b) 气水合物形成的有利地区主要是一些沉积速率较高的地区,如沉积速率高的陆棚区,三角洲地带,浊积扇、斜坡扇等地带。

c) 气水合物的成藏模式主要有浅部生物甲烷气模式、深部生物甲烷气模式、气藏速冻式、缓慢冷冻式4种。

d) 气水合物的保存对温度和压力条件十分敏感,预测气水合物应该综合考虑那些能引起温压条件发生变化的因素。如构造运动、地热史、全球气温的变化、全球海平面下降、底劈以及块体运动等。其中构造运动、地热史、全球气温变化、全球海平面下降对气水合物的形成与分布规模更大,意义更深远;而底劈和块体运动引起的变化只是局部的。

### 参考文献:

- [1] Bernard B B, Brooks J M, Sacht W M. National gas seepage in the Gulf of Mexico[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, 31: 48- 54.
- [2] Galimov E M, Kvenvolden K A. Concentrations and carbon isotopic compositions of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in gas from sediments of the Black Outer Ridge, Deep Sea Drilling Project Leg 76[A]. Sheridan R E, Gradstein F, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 76[C]. Washington D C: U. S. Government Printing Office, 1983. 403- 407.
- [3] Clay Pool G W, Kvenvolden A A. Methane and other hydrocarbon gases in marine sediment[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 1983, 11: 299- 884.
- [4] Kvenvolden K A, Claypool G E, Threlkeld C N, et al. Geochemistry of a naturally occurring massive marine gas hydrate[J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 6: 703- 713.
- [5] Mountain G S, Tucholke B E. Mesozoic and Cenozoic geology of the U S Atlantic continental slope and rise[A]. Poag C W. Geologic evolution of the United States Atlantic margin[C]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985, 293- 341.
- [6] Claypool G W, Kaplan I R. The origin and distribution of methane in marine sediment[A]. Kaplan I R. National gases in marine sediments [C]. New York: Plenum Press, 1974, 99- 139.
- [7] Hammerschmidt E G. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines[J]. *Industrial Engineering Chemistry*, 1934, 26: 851- 855.
- [8] Ginsburg G D. Gas hydrates of the southern Caspian[J]. *International Geology Review*, 1992, 34: 765- 782.
- [9] Kvenvolden K A, Bernald L A. Hydrates of natural gas in continental margins[A]. Watkins J S and Drake C L. Studies in continental margin geology: American Association of Petroleum Geologists Memoir 34 [C]. 1983, 631- 640.
- [10] Hyndman R D, Davis E E. 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.
- [11] 陈萍,方念乔,等.天然气水合物在地质过程中变化的探讨[J].*地球科学*, 2002, 27(4).
- [12] Kortsenshteyn V N. Effect of periodic glaciations on the formation of the enormously large gas field in the northern part of the Tyumen Oblast[J]. *Akademiya Nauk Doklady*, 1970, 191: 1366- 1369.
- [13] Trofimuk A A, Cherskiy N V, Tsaryov V P. The role of continental glaciation and hydrate formation on petroleum occurrence[A]. Meyer R F. The future supply of nature-made petroleum and gas[C]. New York: Pergamon Press, 1977. 919- 926.
- [14] Du Rochet J. A paleoclimatic explanation for the shallow giant gas reservoir of northern west Siberia [J]. *Bulletin Des Centres De Recherches Exploration Production Elf-Aquitains*, 1980, 4: 1977, 119- 142.
- [15] Solheim A, Elverhi A. Gas-related seafloor craters in the Barents Sea [J]. *Geomarine Letters*, 1993, 21: 12- 19.
- [16] Dillon W P, Paull C K. Marine gas hydrates — Geophysical Evidence[A]. Cox J L. Natural gas hydrates — properties, occurrence and recovery[C]. Boston: Butterworth Publishers, 1983. 73- 79.
- [17] Dillon P, et al. Mapping subseafloor reservoirs of a greenhouse gas methane hydrates[A]. Symposium Directors. Proceedings of the International Symposium on Marine Positioning[C]. Marine Geodesy Committee, Marine Technology Society, Washington D C. 1991. 545 - 554.

## FORMATION AND CONTROLLING FACTORS OF GAS HYDRATES

CHEN Yong-jiao<sup>1,2</sup>, LIU Bin<sup>3</sup>, ZHU Jiarhui<sup>4</sup>

(1. *China University of Geoscience, Beijing 100083, China*; 2. *Jiangnan Oil-Gas Exploration & Development Institute, SINOPEC, Qianjiang, Hubei 433124, China*; 3. *Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China*; 4. *Wuxi Research Institute of Experimental Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China*)

**Abstract:** Gas hydrates is a kind of crystal of natural gases that are caged in water. They mainly exist in polar region and in seafloor where temperature are very low and pressure are very high, because its formation and existence need special temperature and pressure. All geological factors that could affect the temperature and pressure are the controlling factors of their formation and existence. In accordance with analysis of controlling factors, a formation model of gas hydrates was proposed, with that may provide an useful clue for exploration of this kind of resource.

**Key words:** controlling factor; model of formation; gas hydrate

(continued from page 279)

## STUDY OF SUBTLE GLUTENITE RESERVOIRS IN SYN-DEPOSITIONAL FAULT ZONES —A CASE STUDY OF THE SHENGBEI FAULT ZONE IN THE DONGYING DEPRESSION

ZONG Guohong<sup>1</sup>, FENG Youliang<sup>2</sup>, LIU Chenghua<sup>3</sup>, LI Chuanhua<sup>2</sup>,  
HAO Xuefeng<sup>2</sup>, GUO Yuxin<sup>2</sup>, WANG Weiqing<sup>2</sup>

(1. *Exploration Dept. of Shengli Oilfield Corporation Ltd. SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China*;  
2. *Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Corporation Ltd. SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China*; 3. *Shengli Production Crew of Shengli Oilfield Corporation Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257051, China*)

**Abstract:** Based on the principles of tectonic sequence analysis and base level analysis, high-resolution seismic sections, log curves and lithofacies data, the depositional characteristics of the lowstand sand bodies of Shengbei fault zone in the Dongying Depression and their development and the significance in petroleum geology were studied in detail. It showed that the lowstand sand bodies of the Shengbei fault zone consisted of alluvial fan, fan delta, turbidite fan and mini delta. The development of sand bodies was controlled by syn-depositional fault and the lower part of the sequences near the fault break zone was favourable for occurrence of subtle reservoirs.

**Key words:** subtle glutenite reservoir; syn-depositional fault zone; the Dongying Depression