

文章编号: 1001-3873(2010)06-0563-04

# 天然气水合物成藏机理及主控因素

魏伟 张金华 吝文王 莉

(中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院 河北 廊坊 065007)

**摘 要** 天然气水合物在世界范围内分布广泛,主要分布在海洋和冻土带地区,并与地质构造环境密切相关。目前已发现的天然气水合物矿点,主要是通过似海底反射地震显示进行识别的。天然气水合物的甲烷来源主要有生物气、热解气和无机成因气,大多数研究主要立足于甲烷气的成因来探究天然气水合物的聚集和成藏机理。分析了天然气水合物形成的主控因素,包括气源、沉积、构造、温压等条件,这些条件控制着天然气水合物的赋存状态、形成规律和规模大小,并对墨西哥湾天然气水合物成藏有利条件进行了分析,对我国天然气水合物的勘探有借鉴意义。

**关键词** 天然气水合物;成藏机理;有利条件;规模

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

在当今能源供应紧张的背景下,天然气水合物更凸显其重大的战略地位。因此,对天然气水合物的勘探和开发已引起越来越多国家的重视。开展天然气水合物成藏机理及主控因素研究对天然气水合物的勘探开发具有重要的指导作用。

## 1 天然气水合物分布及类型

天然气水合物是一种由水分子和气体分子组成的似冰状笼形化合物,其外形如冰晶状,通常呈白色,广泛分布于大陆边缘海底沉积物和永久冻土层中<sup>[1]</sup>。它的分子式可以用  $M \cdot nH_2O$  来表示,式中  $M$  表示“客体”分子,  $n$  表示水合系数。在这种冰状的结晶体中,甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、常态丁烷、氮、二氧化碳和硫化氢等“客体”分子充填于水分子结晶骨架结构的孔穴中,它们在低温高压(0~10℃, 10 MPa 以下)条件下通过范德华力稳定地相互结合在一起。由于天然气水合物中通常含有大量的甲烷或其他碳氢气体分子,因此极易燃烧,在燃烧后几乎不产生任何残渣和废弃物,是一种非常洁净的能源。

### 1.1 天然气水合物的分布

天然气水合物在世界范围内分布广泛,主要分布在冻土带和海洋,并与地质构造环境密切相关。大陆天然气水合物产于地球高纬度地区永冻层深部,如西西伯利亚地台的麦索亚哈气田、阿拉斯加北部的普拉德霍湾油田;海洋深水区的底部和海洋平原是天然气水合物成藏并赋存的最佳场所,且一般多分布于水深大于 200 m 的洋底之下、300~1 000 m 松散沉积岩中。

虽然天然气水合物分布广泛,但迄今为止,全球范围内天然气水合物资源量还未作过精确的估算。

全球已发现大量天然气水合物,其中主要是通过似海底地震反射显示进行识别的。截至 2007 年底,世界上已发现有天然气水合物的地区大约有 132 处<sup>[2]</sup>,主要分布在西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、四国海槽、南海海槽;东太平洋海域的中美海槽、北加利福尼亚-俄勒冈滨外、秘鲁海槽;大西洋海域的美国东海岸外布莱克海台、墨西哥湾、加勒比海、南美东海岸外陆缘、非洲西西海岸海域;印度洋的阿曼海湾;北极的巴伦支海和波弗特海,南极的罗斯海和威德尔海,以及里海等(图 1)。其中研究较为深入的地区有东太平洋海域的中美洲海槽、美国大陆边缘的北加利福尼亚滨外、西太平洋南海海槽、大西洋海域的布莱克海底高原、墨西哥湾,以

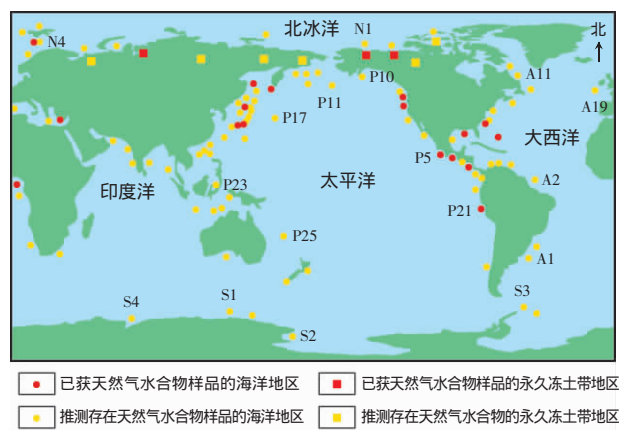


图 1 世界天然气水合物分布(据 Matsumoto, 2001, 修改)

收稿日期 2010-07-07

基金项目 中石油科技管理部项目(2008B-0501)

作者简介 魏伟(1966-)男,新疆石河子人,高级工程师,博士,石油地质 (Tel)010-69213292 (E-mail)weile@petrochina.com.cn.

及印度巴尔的摩海槽和哥伦比亚盆地等。

近年来,我国天然气水合物勘探也取得了重大进展。2007年5月,在南海北部海域成功钻获天然气水合物实物样品,2008年11月又在祁连山冻土区发现天然气水合物实物样品<sup>[3,4]</sup>,也是全球首次在中低纬度高山冻土区发现天然气水合物实物样品,具有重要的科学意义和经济意义。

## 1.2 天然气水合物成因类型

国外对海洋天然气水合物成因研究进行得较早,大多数研究主要立足于甲烷气的成因来探究天然气水合物的聚集和成藏机理。天然气水合物的甲烷来源主要有生物气、热解气和地球深部非生物成因气(无机成因)<sup>[5]</sup>。目前利用碳氢化合物气体成分  $C_1$  与  $(C_2+C_3)$  的比值  $R$  和甲烷的同位素  $\delta^{13}C$  值来判别甲烷成因。

(1) 热解成因 热解成因甲烷的  $R$  值大于 100,其甲烷的  $\delta^{13}C$  值大于 -55‰。其母质仍为有机质。目前在墨西哥湾和里海发现的天然气水合物,其甲烷来源主要是热解成因,其形成机理与常规天然气相同。热成因气体一般来源于深部,要在较浅的沉积物中形成天然气水合物,必须要有良好的输导体系,保证有充足的流体载体、运移动力以及运移通道。

(2) 生物成因 微生物成因甲烷的  $R$  值 > 1 000,  $\delta^{13}C$  值为 -90‰~-55‰。海底沉积物有机质通过甲烷菌形成的甲烷属于生物成因气甲烷。生物成因气甲烷的生成途径主要有 2 种:二氧化碳( $CO_2$ )的还原作用和发酵作用。大多数甲烷生成菌种都有经过  $CO_2$  还原而生成甲烷的能力。发酵作用则是少数几种产甲烷菌的作用,作用过程中乙酸酯发生脱酸作用形成甲基,最后转变成甲烷。生物气生成于缺氧环境,它的生成取决于产甲烷菌的形成和分布。

由于生物气的形成是一个持续的动态过程,并且生成生物气的地层埋藏浅、岩性较疏松,所以相对热解气而言,生物气更易于形成天然气水合物。

(3) 地球深部非生物成因 无机成因甲烷的碳同位素组成一般为 -15‰~-25‰。到目前为止,世界上还没有找到无机成因的天然气水合物矿点,但并不能因此得出结论认为自然界没有无机成因天然气水合物。尽管无机成因的天然气在东海陆架盆地得到证实,有石门潭  $CO_2$  气田和天外天气田,但是人们对无机成因天然气的认识还是相对有限,无机成因天然气水合物的形成还值得进一步探讨。

## 2 天然气水合物形成的主控因素

天然气水合物形成的控制因素很多,主要有气源条件、沉积条件、构造条件、温压条件等<sup>[6]</sup>,这些条件控制着天然气水合物矿藏的赋存状态、形成规律和规模。

### 2.1 气源条件

生物成因气总量虽然大,但是丰度低,且以渗透方式运移,很难局部富集,往往呈分散式分布,形成分散的水合物矿藏。而热解成因气通常以断层为运移通道,在合适的温度压力条件下,容易局部富集成矿。经研究揭示高丰度大规模水合物矿藏中残余气体部分含有源于地壳深处的氢稀有气体,而这种气体不可能原地形成于近海底沉积物中,因此推测大型高丰度水合物所需的烃类气体大多来源于深部地层生烃窗内的热成因裂解气。

因此,在分析气源条件时,对其下部是否有丰富的热解气源研究非常重要。所以,富含油气盆地(如墨西哥湾)更容易在浅层形成大规模高丰度水合物矿藏。

### 2.2 沉积条件

天然气水合物成矿不仅与构造环境、构造条件密切相关,而且与赋存层的沉积速率、沉积相之间存在着一定的内在联系。天然气水合物的形成要有充足的气源,提供水合物形成所必须的天然气母质,还要有一定的孔隙空间和水介质,提供水合物的储集空间。

(1) 沉积速率 沉积速率是控制水合物聚集的最主要因素之一,快速沉积提供了大量的有机质,从而为水合物的生成提供了气源,同时也有利于水合物富集与成藏。究其原因,主要是因为沉积速率高的区域易形成欠压实区,从而可构成良好的流体输导体系,将有利于水合物的形成与成藏。大多数海洋天然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。因此,在快速沉积区,结合气源分析,通常可预测存在丰富天然气水合物的有利区域。含天然气水合物地层的沉积速率一般较快,超过 0.3 mm/a。

(2) 沉积物性质 如果沉积物粒度太粗,则封盖条件不够,如果太细,则不能提供足够的储积空间。越来越多的研究实例表明,水合物偏向存在于细粒级的沉积物中。

(3) 沉积相 从沉积相角度讲,重力流沉积和半远洋(近海)沉积物,尤其是等深流和浊流沉积是阵发性、短暂的、快速沉积事件的产物,为天然气水合物的良好储集层,提供了天然气水合物成藏的物质基础。这是由于其通常具有大量悬浮物质,快速沉积,沉积物的含砂率较为适中,有足够的孔隙空间,具备形成良好的孔、渗性能的条件,在适当的温压条件下,就可形成水合物矿藏。沉积相往往与水合物重要的识别标志——似海底反射在空间上有较好的对应关系<sup>[7]</sup>(图 2)。

(4) 有机碳含量 沉积物中的有机碳含量与水合物的形成有着密切关系,也决定着水合物矿藏规模。

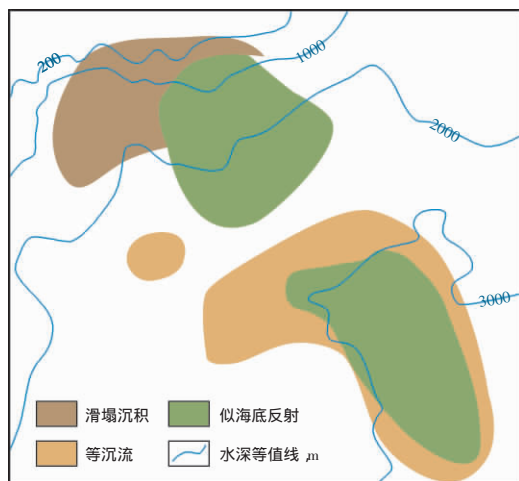


图2 沉积相与似海底反射对应关系

海洋沉积中要形成一定规模的天然气水合物需要大量的甲烷气体,世界已知水合物区的有机质含量大多都在0.5%以上。

### 2.3 构造条件

构造条件是天然气水合物富集成藏的重要控制因素,构造既是流体运移通道,又是水合物成矿场所。通过水合物矿藏的构造控制因素,可以直接对水合物矿藏分类。陆缘地区主要有俯冲-增生、断裂-褶皱、底辟或泥火山、滑塌等4种成矿地质模式,形成增生楔型和海脊型、盆缘斜坡型、埋藏背斜型、断裂-褶皱型、滑塌构造型和底辟型等6类水合物矿藏。

### 2.4 温压条件

天然气水合物是一种冰状固态化合物,为了稳定存在,需要特定的温度和压力条件,一般赋存在低温高压的环境中。影响水合物成矿的温度、压力条件因素包括:表层水和底水温度、地温梯度、静水压力(水深)和静岩压力。研究表明,水温、地温梯度及压力与水合物的埋深和厚度密切相关(图3):海底温度越

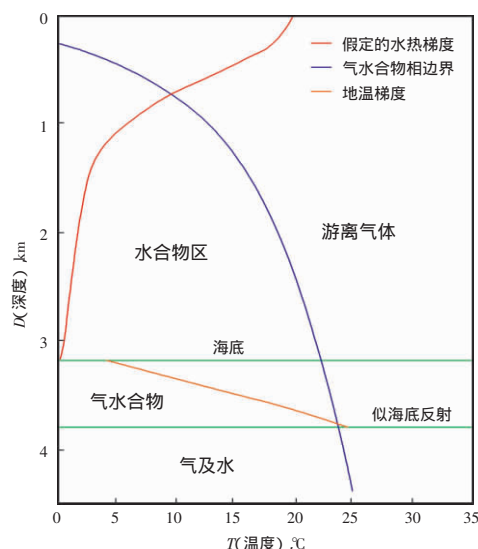


图3 天然气水合物相平衡曲线

低,水合物稳定带厚度越大,反之越薄;地温梯度越大,水合物的埋深较浅,厚度较薄,反之越厚;水深越大,水合物稳定带越厚,反之越薄。

## 3 天然气水合物矿藏实例分析

根据天然气水合物成藏的主控因素,以墨西哥湾天然气水合物藏为例<sup>[8]</sup>(图4),对天然气水合物的形成进行探讨,希望能对我国天然气水合物的勘探有所启发。墨西哥湾盆地是北美洲与非洲-南美洲板块分离的产物,盆地中央为洋壳,周围是陆壳,中间为过渡带,是一个相对简单、近似圆形构造的盆地,直径约1500 km,沉积物厚度10~15 km。

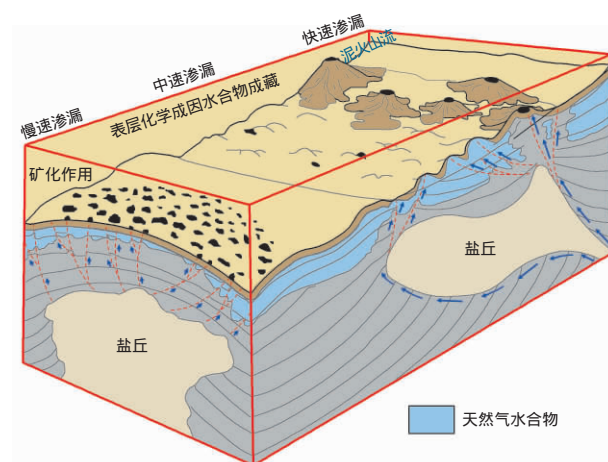


图4 墨西哥湾盐丘构造与水合物分布关系(Robert,等,2006)

(1) 气源 墨西哥湾是海底水合物产出油气渗漏富集的典型海域。2002年,通过载人深潜器在墨西哥湾GC238、GC527和EW1001位置的海底表层取得沉积物样品。经饱和烃色谱分析,绝大多数样品都有明显的不可分辨的混合物隆起,而且混合物隆起的位置也不尽相同。有的样品混和物隆起的位置在 $C_{12}$ — $C_{21}$ 之间,可能主要反映了细菌微生物的注入及其对有机质的改造作用。而有的样品表现为以 $C_{20}$ 为中心的前峰群混和物隆起和以 $C_{27}$ — $C_{29}$ 为中心的后峰群隆起的叠加,且后峰群混和物隆起明显,这表明沉积物受到海底油气渗漏的污染。结果显示墨西哥湾存在明显的深层油气运移到浅层,在合适的温压下,形成水合物矿藏。

(2) 沉积条件 在晚侏罗世以前,墨西哥湾的沉积物由芦安盐(中侏罗世)组成,大多为陆相红层。自晚侏罗世以来,密西西比河系统的流域盆地向墨西哥湾输送沉积物。晚侏罗世,来自大陆内部构造隆起区北部和西部的大量陆源碎屑物质,覆盖了墨西哥湾原来的碳酸盐环境。墨西哥湾北部第四纪沉积物巨厚。在路易斯安那州-德克萨斯州的近岸盆地内盐丘极为发育,北部为半连续的刺穿盐底辟构造,南部为近似



连续的大面积盐块和盐舌。现今的大陆架已经堆积了3 600 m厚的沉积物,而密西西比冲积扇附近的墨西哥湾深水盆地也已经堆积了3 000 m厚的沉积物。巨厚的沉积物为水合物形成提供了储集条件。

(3) 构造条件 墨西哥湾属被动大陆边缘,水合物分布主要受盐丘构造控制,盐丘构造活动使上覆沉积岩形成易碎区,所以断层比较发育。由于盐丘上拱并刺穿地层,把深部大量气体带到浅部地区,在合适的温压条件下形成水合物。盐丘的刺穿作用与水合物的发育程度有着直接关系。从北向南的盐丘个体逐渐增大,盐层顶部的连续性增大,即盐丘的刺穿运动从北向南逐渐减弱。而水合物厚度从北向南也是逐渐减薄,由快速渗漏系统过渡到慢速渗漏系统。

## 4 结 论

天然气水合物主要分布在聚合大陆边缘大陆坡、被动大陆边缘大陆坡、海山、内陆海及边缘海深水盆地和海底扩张盆地等构造单元中,这些地区构造环境具有形成天然气水合物所需的充足的气源,具备流体运移的条件,有合适的储集空间,因而成为天然气水合物分布和富集的主要场所。

温压条件是天然气水合物形成的前提,气源条件是水合物形成的物质基础,直接控制着水合物气藏类型,沉积条件控制着水合物容矿场所,并提供封盖条件,构造控制天然气运移通道。四者都对天然气水合物矿藏的富集起着直接控制作用,若四方面条件都有利,则能形成大规模、高丰度的天然气水合物矿藏,另外成藏气源条件、沉积条件和构造条件往往是相互影响、相互作用的。其中,构造条件往往控制着气源条件

和沉积条件。构造活动直接产生断裂带,是深部热解气源的必要通道,也是沉积层中生物气聚集的重要场所,而沉积物形成的底辟作用也是断层发育的重要因素。因此,在分析天然气水合物成藏控制因素的时候,既要单因素分析,又要多因素结合,才能正确地得出某个具体天然气水合物矿藏的成藏控制因素。而借鉴国外典型天然气水合物成藏条件,可为我国天然气水合物的勘探开发提供实际有效的指导。

## 参考文献:

- [1] 公衍芬,曹志敏,郑建斌. 天然气水合物的特征及识别标志[J]. 地质与资源, 2008, 17(2): 139-147.
- [2] 沙志彬,郭依群,杨木壮,等. 南海北部陆坡区沉积与天然气水合物成藏关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 89-98.
- [3] 姚永坚,黄永祥,吴能友,等. 天然气水合物的形成条件及勘探现状[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(6): 668-672.
- [4] 祝有海,张永勤,文怀军,等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1 762-1 771.
- [5] 付少英. 烃类成因对天然气水合物成藏的控制[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 263-267.
- [6] 栾锡武,赵克斌,孙冬胜,等. 鄂霍次克海天然气水合物成藏条件分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 91-100.
- [7] 于兴河,张志杰,苏新,等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 311-315.
- [8] 吴时国,姚伯初. 天然气水合物赋存的地质构造分析及资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

## Mechanism and Controlling Factors of Natural Gas Hydrate Accumulation

WEI Wei, ZHANG Jin-hua, LIN Wen, WANG Li

(Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China)

**Abstract:** Gas hydrates are widely distributed in the world, mainly in the oceans and permafrost regions, and closely related with the geological and structural environment. Now, these gas hydrates deposits that have been found are mainly identified by BSR. The methane origin in gas hydrates includes biogenic, pyrolysis gas genetic and inorganic gases. The gas hydrates accumulation and mechanism explored by most researchers is mainly based on the genesis of methane gas. This paper analyzes the controlling factors of forming gas hydrates, including the gas source, deposition conditions, geological structural conditions, temperature and pressure conditions, etc. It is these that control the existing state, formation mechanism and scale of gas hydrates deposits. Also, this paper analyzes the favorable conditions of gas hydrate accumulation in the Gulf of Mexico for the purpose of being taken as a reference for China's gas hydrate exploration.

**Key Words:** natural gas hydrate; accumulation mechanism; favorable conditions; scale