

海洋中天然气水合物的成矿机理 与资源评价概述*

孙美琴,徐茂泉,许文彬,雷怀彦

(厦门大学海洋系、亚热带海洋研究所,福建 厦门 361005)

摘要:本文综述了近年来国内外关于天然气水合物成矿机理研究的新进展,阐明了作为一种非常规的天然气矿藏,其形成和稳定存在除了需要特定的温、压条件外,更需要合适的成矿地质条件,包括沉积构造环境、充足的气源、有效的运移通道、有效的储集层和保存条件等.文中还介绍了天然气水合物资源评价方法及国外研究者对全球气体水合物中甲烷量的估算值,由于其结果相差几个数量级,表明目前还没有成熟的天然气水合物资源定量评价方法.

关键词:海洋资源;成矿机理;综述;资源评价;天然气水合物

中图分类号:P74

文献标识码:A

文章编号:1000-8160(2004)04-0521-09

天然气水合物(gas hydrates)是一种类似冰状结晶矿物,其中烃类和非烃类气体通过氢键连接在水分子的致密格架中.它通用的分子式可用 $M \cdot (H_2O)_n$ 表示,其化学成分不稳定,式中 M 为水合物中的气体分子,即客体分子.目前已经发现的天然气水合物结构有 I 型、II 型和 H 型 3 种,II 型和 H 型结构的天然气水合物与 I 型相比可以在较高的温度和较低的压力下保持稳定,但自然界产出的天然气水合物主要以 I 型为主^[1].

自然界中的天然气水合物是一种广泛地存在于海洋和陆地中的矿物.据全球天然气水合物资源量估算结果,其中所包含的能源可能比所有常规燃料资源还要多^[2].由此人们推测,当常规能源枯竭时,天然气水合物可能成为未来的能源^[3].另外,地质历史中的全球气候变化可能与水合物的迅速和大量分解有关^[4,5].当海洋沉积物中存在着大量天然气水合物时,它也被认为是一种地质灾害^[6].

1 天然气水合物的成矿机理研究

关于天然气水合物的成矿机理国内外已作过不同程度的研究^[7~12],其中包括烃源岩类型和生成、运移、聚集的条件和过程.固态矿床和油气藏都是在一定的成矿系统中产生的,这个系统包括控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿过程^[10],而天然气水合物则是一种非常规的天然气矿藏,其成矿系统不同于一般的油气田.天然气水合物的形成条件首先需要气源,其次是气体水合物稳定带(GHSZ).它在形成中经历了从成矿物源—流体运移—聚集成矿—有效保存这一完整的成矿过程^[10].水合物的形成及稳定存在除了需要特定的温、压条件外,更需

* 收稿日期:2003-12-26

作者简介:孙美琴(1976~),女,硕士生.

要合适的成矿地质条件,包括沉积构造环境、充足的气源、有效的运移通道、有效的储集层和保存条件等。

1.1 气体来源

国内外有关学者认为:生物成因气、热解成因气、无机成因气均可作为水合物的气体来源,只要这些不同成因的天然气运移至特定低温高压条件下,均可形成天然气水合物矿藏^[13~15]。

1.1.1 有机成因气 有机成因烃类气体包括生物成因气和热解成因气,前者是指有机质在细菌的生物化学作用下转化形成的气体;后者是指较大深度下的有机质受热演化作用形成的热解气。根据水合物气体成分 $[R = CH_4 / (C_2H_6 + C_3H_8)]$ 和甲烷的碳同位素组成可判别甲烷成因,生物成因甲烷的 R 值 $> 1\ 000$, ^{13}C 值 $< -60\ ‰$;热解成因甲烷 R 值 < 100 , ^{13}C 值 $> -60\ ‰$ ^[15]。世界各海域分布的天然气水合物,大多以生物成因的甲烷气为主,只有在墨西哥湾和里海的天然气水合物的甲烷主要是热解成因^[16,17]。有的产地两种成因的甲烷气均有存在,例如墨西哥湾天然气水合物中除了主要为热解成因甲烷外,也具有微生物成因甲烷^[18],因此称为混合成因甲烷。

1.1.2 无机成因气 无机成因气是指地球深部来源气体,国内有关学者认为无机成因气也可以作为水合物的气体来源^[13,14]。但到目前为止,世界上还没有关于找到无机成因的天然气水合物矿点的报道,国外的文献也没论述过这种成因。

1.2 温压条件

天然气水合物形成于低温高压条件下,最佳的形成温度是 $0 \sim 10\ ^\circ C$,压力则应大于 $10\ MPa$ ^[8]。但具体到高纬度地区和海洋中情况则不同,一般地说,在极地因其温度低于 $0\ ^\circ C$,水合物形成的压力无需太高,如阿拉斯加、加拿大和俄罗斯北部陆地的永久冻土带与陆架海区均可出现天然气水合物。在海洋中,由于上覆海水静水压力较高,故可在较高的温度下形成天然气水合物^[19]。

1.3 地质条件

天然气水合物的形成与地质构造环境密切相关,其形成的沉积控制因素有岩性、沉积速率、有机碳含量、沉积环境及沉积相等几个方面^[20]。世界上已探明的天然气水合物位置主要是在大陆坡、水下高原、边缘海和内陆海,尤其是那些与泥火山、盐(泥)底辟及大型构造断裂有关的海盆中。此外,大陆上的大型湖泊(如贝加尔湖),由于水深较大且有气体来源,温、压条件适合,同样可以生成天然气水合物^[19]。较快的沉积速率有利于水合物的形成,已发现的水合物主要产于新生代的地质层中,尤其是晚第三纪以来的松散沉积中,它们的沉积速率一般超过 $30\ m/Ma$ ^[20]。储集层岩性为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩及砂砾岩,其中的水合物含量最高可达 $95\ \%(m/m)$ ^[19]。海底沉积物中有机碳分析研究表明,水合物发现地沉积物中有机碳(TOC)含量一般较高 $[1\ \%(m/m)]$ ^[21],有机碳含量低于 $0.5\ \%(m/m)$ 则难以形成水合物^[22]。

1.4 天然气水合物稳定带

天然气水合物稳定带(GHSZ)是指在特定的温度和压力条件限制下的一个范围,在这个范围内天然气水合物与游离烃气达到相平衡^[23]。稳定带控制着天然气水合物的成矿作用、分布规律和演化过程,其厚度与水深、底层水温度、压力、地温梯度、孔隙水盐度、天然气成分有关。深部海洋沉积物的物理性质和表面化学特征也会影响天然气水合物的稳定性,同时会降低

稳定带的厚度^[23],但目前研究一般不考虑这些因素。稳定带厚度主要取决于地温梯度和海水深度,并且随着水深的增加而增厚;当水深不变时,潜在厚度取决于地温梯度,地温梯度越高,稳定带厚度越薄,反之越厚。

1.5 海底天然气水合物的聚集模式

海底天然气水合物的形成聚集与烃流体的运移密切相关,流体(气和水)运移到气体水合物稳定带中,然后形成天然气水合物矿藏^[24]。天然气被运移到渗透性的沉积物中为水合物成矿提供了气体来源;一般认为与水的运移无关紧要,因为沉积物中普遍存在水。然而 Suess 等(2001)通过对墨西哥湾和水合物海岭这些地方的研究,认为水也是天然气水合物成矿的一个重要决定因素^[25];而对 Haakon Mosby 泥火山分布的天然气水合物研究也发现其中的水来源于 2~3km 深的海底沉积物中,而不是原地沉积物中的水^[26]。Milkov 和 Sassen (2002)根据流体的运移模式和稳定带(GHSZ)中天然气水合物的含量,把海底天然气水合物的聚集分为 3 种类型:(1)构造聚集,(2)地层聚集,(3)混合聚集(图 1)^[11]。

1.5.1 构造聚集模式 海底气体水合物聚集带最有可能与烃流体的向上渗透有关,其中高渗透带主要由泥火山、断层和底辟构造等所控制。这些地质构造的发育,不仅为天然气水合物赋存提供了颇具规模的构造空间,而且为深部气及浅成气的垂向、侧向运移提供了通道,使流体扩散迁移到天然气水合物稳定带中(图 1a、b)。有关研究表明,墨西哥湾的西北部、水合物海岭、Haakon Mosby 泥火山都存在着构造聚集模式^[27~29]。这些地区的天然气水合物形成于不同的水深和不同的构造环境,但同时它们又具有许多共同特征(表 1)。天然气水合物在靠近海底的地方形成,在海底上方有油气苗出露及气泡产生(图 1a、b)。天然气水合物形状以团块、层状和块状为主,脉状充填于构造及沉积物孔隙中,含量普遍较高,发育有细菌甲烷成因、热解成因和混合成因的 *型* 和 *型* 结构。

在构造聚集模式中,水合物矿床的形态由流体通道的形态、流速、气体成分和温度场所控制,主要分布在活动断层和泥火山口周围,因为高的流体运移速度,在稳定带中形成纵向堆积,所以一般发育厚的天然气水合物矿层^[30]。构造聚集的海底模拟反射层(BSR)是不连续、不规则的^[31],即表明水合物稳定带的基底与海底不平行,也说明这种聚集是流体的垂向运移、堆积,没有对底部的游离气形成较好的封盖。据研究,在南里海的 Buzdag 泥火山和挪威海的 Haakon Mosby 泥火山分布的天然气水合物气体资源量均为 $(3 \sim 4) \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[24,26],相当于小型常规天然气田资源量。Milkov (2000)初步估计全球泥火山控制的水合物中聚积的甲烷在标准状态下为 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^3$ ^[32]。有人分析,蕴藏量大的水合物区可能出现在与断裂活动有关的地区,例如墨西哥湾^[27]和 Cascadia 边缘^[33]。

1.5.2 地层聚集模式 在地层聚集模式中,天然气水合物在渗透性的沉积物中结晶,一般在靠近稳定带基底的地方发育薄的水合物矿层,其矿床形态主要由地层的形态和流体运移所控制(图 1c)。据研究,布莱克海岭、Nankai 海槽、墨西哥湾的小盆地都存在着地层聚集模式(表 1);在该模式中天然气水合物主要以细粒状散布于沉积物孔隙中,也发现有团块和层状者,稳定带中天然气水合物含量通常很低,也有个别较高的,例如 Nankai 海槽,因其砂层渗透性非常好,故含量较高^[27,34,35]。地层聚集的天然气水合物主要是细菌甲烷成因的 *型* 结构,甲烷来自于沉积物中或者是由较深部地层缓慢运移来的。因为天然气水合物在地层中的广泛分布,同时 GHSZ 以下往往伴随着游离气的出现^[36],所以 BSR 通常出现在地层聚集的水合物基底。

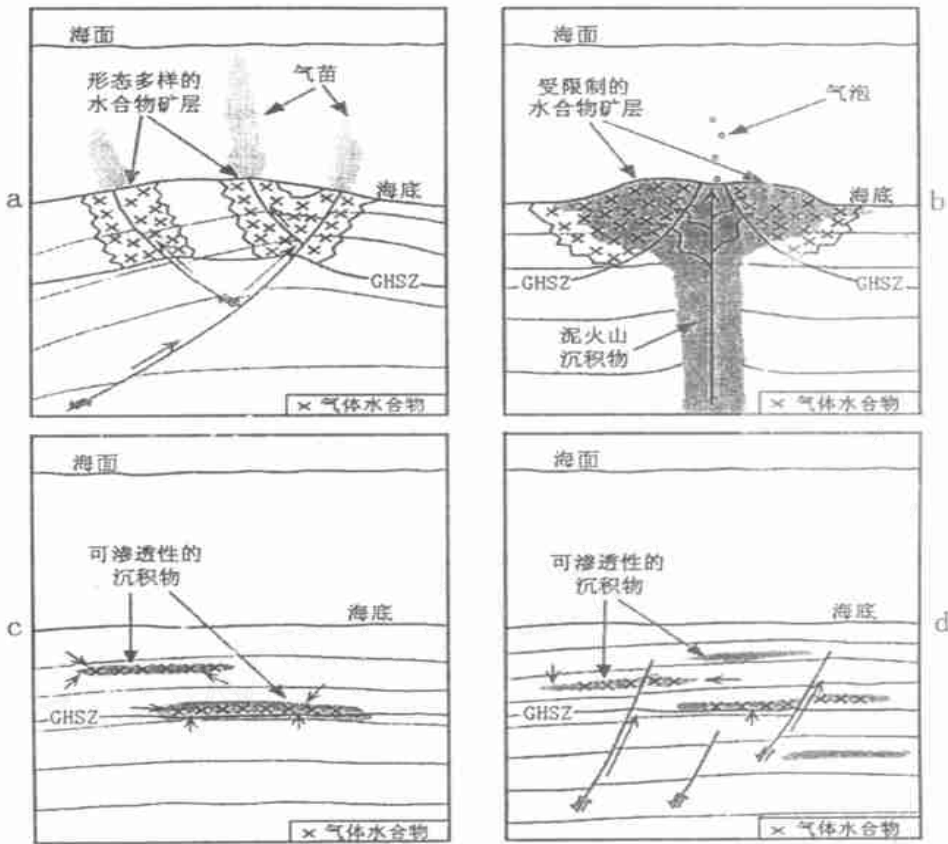


图 1 气体水合物的 3 种聚集模式^[11]

Fig. 1 Three types of gas hydrate accumulations^[11]

a. 断层控制的水合物聚集, b. 泥火山控制的水合物聚集, c. 地层聚集, d. 混合聚集

表 1 天然气水合物不同聚集模式地区的特征^[11]

Tab. 1 Regional characteristics of gas hydrate accumulations^[11]

项 目	构造聚集			地层聚集		
	墨西哥湾的西北部	水合物海岭	Haakon Mosby 泥火山	墨西哥湾的西北部	布莱克海岭	Nankai 海槽
水深(m)	440~2 500	700~1 000	1 250~1 260	615~2 500	1 000~4 000	700~3 500
分布面积(km ²)	23 000	375	1.8	22 500	26 000	32 000
水合物出现的地下深度(m)	0~1 900	0~200	0~160	20~1 500	58~620	50~500
气体来源	从深部快速运移来的生物、热解、混合等成因的气体			主要是原地的生物成因气体,部分来自深部缓慢供应的气体		
沉积物中水合物含量(% , m/m)	平均值 20~30 最高值为 100	最高值为 20~60	最高值为 25	最高值为 1~2	平均值为 2 最高值为 14	平均值为 10(?) 最高值为 30
天然气资源量(m ³)	(8~11) ×10 ¹²	未见报道	3 ×10 ⁸	(2~3) ×10 ¹²	2.8 ×10 ¹³	6 ×10 ¹³
天然气资源密度(m ³ /km ²)	(4~5) ×10 ⁸	未见报道	1.7 ×10 ⁸	1 ×10 ⁸	12 ×10 ⁸	18.4 ×10 ⁸
渗透性	好(构造)	好(构造)	好(构造)	差(沉积物)	差(沉积物)	差-好(沉积物)

1.5.3 混合聚集模式 这种模式中气体水合物出现在渗透性的地层中,但是成矿气体是沿着断层和底辟构造等通道快速运移而来的(图 1d). 如里海就存在着这种模式,天然气水合物聚

集层厚约 200m,位于海底 300~500m 以下,在其附近有断层和活跃的泥火山为流体向上运移提供通道,然后在稳定带中结晶形成水合物^[37]. Milkov 和 Sassen (2002) 认为水合物海岭、Nankai 海槽和布莱克海岭都可能存在着这种聚集,但仍需要进一步的研究来证实这些地方水合物聚集的控制因素^[11].

总之,海底天然气水合物的形成是由许多因素决定的,包括海水的温度和压力随着深度的变化,海底热流量的大小、地温梯度、沉积物的导热性、沉积物和天然气的组成,以及海水的矿化度等. 这些因素的综合作用控制着天然气水合物的形成,但对其成矿过程尚未进行更深入具体的研究,这就极大地妨碍了人类对全球天然气水合物资源的评价.

2 天然气水合物的资源评价

2.1 地理分布

国内外研究表明,总面积约 27% 的陆地和海洋总面积的 90% 具有形成天然气水合物的温、压条件. 目前已发现的主要分布地区有两类:一类是水深 300~4 000m 的海洋,赋存沉积物一般为海底以下 0~1 500m^[38]. 另一类是高纬度大陆地区永久冻土带^[39]. 天然气水合物绝大多数的储量都赋存于海底沉积物中,主要分布在世界各大洋边缘海域的大陆斜坡、陆隆海台和盆地及一些陆架海区.

2.2 资源评价

海底天然气水合物是具有巨大经济前景的非常规海洋矿产资源. 目前,在没有开采实例的情况下,科学地设定和选取各种参数进行天然气水合物资源量的估算,对该资源的勘探和评价有着重要的实用意义. 文献^[11]报道的不同时期估算出的世界海洋天然气水合物资源量和常规天然气资源量见图 2.

美国学者 Collett (1993) 认为天然气水合物中的天然气量主要取决于以下 5 个条件:面积、储层厚度、有效孔隙度、水合指数、气水合物饱和度^[39]. 因此气体水合物中的气体体积 = 气体水合物分布面积 (m²) × 气体水合物层厚度 (m) × 气体水合物储层孔隙度 (%) × 气体水合物饱和度 (%) × 气体水合物产气因子. 但是天然气水合物饱和度是比较难以测定的参数,迄今除大洋钻探计划 (ODP) 164 航次资料外,还没有得到天然气水合物在海底沉积物中产状方面的确切资料. 因此,目前只能依据测井和孔隙水地球化学分析资料来推断水合物在沉积物中的饱和度^[22].

Gornitz 和 Fung (1994) 采用容积法计算

公式 $V = A \cdot Z \cdot \phi \cdot H \cdot E$ 来评价天然气水合物资源量. 式中: V 为甲烷资源量 (m³); A 为水合物分布面积 (m²); Z 为水合物稳定带平均厚度 (m); ϕ 为沉积物平均有效孔隙度 (%); H

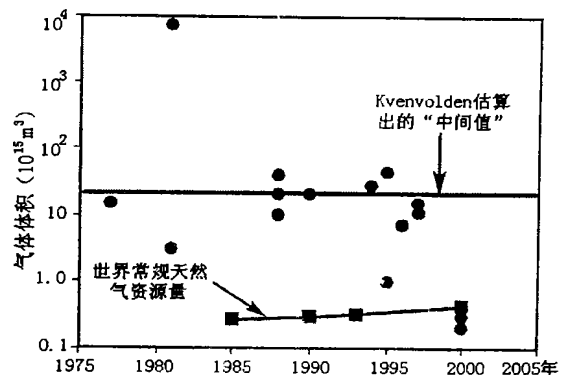


图 2 不同时期所估算的世界海洋天然气水合物资源量和常规天然气资源量^[11]

Fig. 2 Resource amounts of marine gas hydrate and conventional gas estimated in various periods^[11]

为气体水合物的充填率(%) ; E 为水合物中天然气容积倍率^[21]。该公式是以气体水合物在稳定带内连续分布为依据, 以此设定相关参数进行测算, 但实际上稳定带厚度不等于天然气水合物矿层厚度, 另外天然气水合物的充填率也是很难确定的一个值, 无论在横向上, 还是纵向上, 该值变化均极大。所以能把握其精度的参数非常有限, 计算的水合物资源量也就不够准确。

许多研究者对全球天然气水合物中的甲烷蕴藏量进行了估算^[2, 40, 41]。由于基础资料和估算方法的不同, 以及目前对天然气水合物贮存条件和规律认识的局限性, 估算数字相差几个数量级。这也说明天然气水合物资源量评价仍属世界级的科学难题, 尚没有找到公认较合理的方法及参数。目前估算的天然气水合物中甲烷蕴藏量在陆上冻土带为 $1.4 \times 10^{13} \sim 3.4 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ^[40], 海洋沉积物中为 $0.2 \times 10^{15} \sim 7.6 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ^[21]; Kvenvolden(1999) 提出海洋水合物中的甲烷资源量的中间值为 $21 \times 10^{15} \text{ m}^3$ (图 2)^[21], 大多数人也公认该值是比较合理的, 即储存在天然气水合物中的有机碳约是当前已探明的所有化石燃料(包括煤、石油和天然气)总含碳量的两倍。Milkov 和 Sassen(2003)认为 Dobrynin 等(1981)所估算的 $7.6 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 的资源量可能过高, 而 Soloviev(2000)估算为 $0.2 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 的资源量, 大约只有世界常规天然气储量($0.436 \times 10^{15} \text{ m}^3$)的一半, 这可能又过于保守^[41]。

3 结语

天然气水合物作为一种非常有潜力的化石燃料, 其重要性已经越来越引起人们的关注, 研究方法也在不断地发展和更新, 但是大规模商业化开采可能还需要一段较长的时间。Grauls(2001)预测陆地上的天然气水合物在 2010~2015 年后, 海洋中的天然气水合物要在 2030 年后有望被大规模开采^[42]。由此可见, 要使天然气水合物大规模开采成为现实, 还需做大量的基础研究工作。根据国外当前水合物研究的发展动向, 我们建议今后研究工作重点应主要放在以下 3 个方面: (1) 进一步深入研究天然气水合物的成矿机理, 了解天然气水合物形成、稳定分布和分解的主要控制因素; (2) 探求科学、可靠的资源评价方法, 确定天然气水合物资源量和分布; (3) 研究天然气水合物试开采的相关技术, 以及其开采利用对全球环境变化的影响。

参考文献:

- [1] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases[M]. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [2] Kvenvolden K A. Potential effects of gas hydrate on human welfare[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 1999, 96: 3 420 ~ 3 426.
- [3] Collett T S, Kuuskraa V A. Hydrates contain vast store of world gas resources[J]. Oil and Gas Journal, 1998, 96(19): 90 ~ 95.
- [4] Katz M E, Pak D K, Dickens G R, et al. The sources and fate of massive carbon input during the latest Paleocene thermal maximum[J]. Science, 1999, 286: 1 531 ~ 1 533.
- [5] Hesselbo S P, Grocke D R, Jenkyns H C, et al. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event[J]. Nature, 2000, 406: 392 ~ 395.
- [6] Campbell K J. Deepwater geohazards: an engineering challenge[J]. Offshore, 1991, 51: 46 ~ 51.
- [7] 卢振权, 吴必豪, 祝有海. 南海潜在天然气水合物藏的成因及形成模式初探[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 232 ~ 239.
- [8] 方银霞, 黎明碧, 金翔龙, 等. 东海冲绳海槽天然气水合物的形成条件[J]. 科技通报, 2003, 19(1): 1 ~ 5.
- [9] 雷怀彦, 王先彬, 房玄, 等. 天然气水合物研究现状与未来挑战[J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 493 ~ 496.

- [10] 赵省民, 聂凤军, 曾凡刚, 等. 内生热液矿床与天然气水合物矿床形成机制的比较研究[J]. 地球学报, 2001, 22(3): 237 ~ 242.
- [11] Milkov A V, Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19: 1 ~ 11.
- [12] Milkov A V, Sassen R. Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 111 ~ 128.
- [13] 狄永军, 郭正府, 李凯明, 等. 天然气水合物成因探讨[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 138 ~ 143.
- [14] 龚建明, 戴春山, 蔡峰, 等. 天然气水合物的成因类型初探[J]. 海洋地质动态, 2001, 17(11): 1 ~ 5.
- [15] Ginsburg G D, Solovev V A. Methane migration within in the submarine gas hydrate stability zone under deep-water conditions[J]. Marine Geology, 1997, 137: 49 ~ 57.
- [16] Ginsburg G, Guseynova R A, Dadashev A A, et al. Gas hydrates of the southern Caspian[J]. International Geology Review, 1992, 34(8): 765 ~ 782.
- [17] Sassen R, MacDonald I R. Evidence of structure H hydrate, Gulf of Mexico continental slope[J]. Organic Geochemistry, 1994, 22(6): 1 029 ~ 1 032.
- [18] Sassen R, Joye S, Sweet S T, et al. Thermogenic gas hydrates and hydrocarbon gases in complex chemosynthetic communities, Gulf of Mexico continental slope[J]. Organic Geochemistry, 1999, 30: 485 ~ 497.
- [19] 金庆焕. 天然气水合物——未来的新能源[J]. 中国工程科学, 2000, 2(11): 29 ~ 34.
- [20] 沙志彬, 杨木壮, 梁劲. 天然气水合物成矿的沉积控制因素[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(6): 16 ~ 20.
- [21] Gornitz V, Fung I. Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans[J]. Glob Biogeochem Cycl, 1994, 8: 335 ~ 347.
- [22] Paull C K, Matsumoto R, Wallace P L. Proceedings on ODP, Initial Reports (Vol. 164) [R]. Texas: College Station (Ocean drilling Program), 1996. 164.
- [23] Milkov A V, Sassen R. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 981 ~ 991.
- [24] Ginsburg G D, Soloviev V A. Submarine Gas Hydrates [M]. St Petersburg: VNIIOkeangeologia, 1998. 215.
- [25] Suess E, Torres M E, Bohrmann G, et al. Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia margin[J]. American Geophysical Union Geophysical Monograph, 2001, 24: 87 ~ 98.
- [26] Ginsburg G D, Milkov A V, Soloviev V A, et al. Gas hydrate accumulation at the Haakon Mosby mud volcano[J]. Geo Marine Letters, 1999, 19: 57 ~ 67.
- [27] Milkov A V, Sassen R. Estimate of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine Geology, 2001, 179: 71 ~ 83.
- [28] Trehu A M, Torres M E, Moore G F, et al. Temporal and spatial evolution of a gas hydrate-bearing accretionary ridge on the Oregon continental margin[J]. Geology, 1999, 27: 939 ~ 942.
- [29] Bogdanov Y A, Sagalevich A M, Vogt P R, et al. The Haakon Mosby mud volcano in the Norwegian sea: results of multidisciplinary studies with manned submersibles [J]. Oceanology, 1999, 39: 374 ~ 380.
- [30] Xu W, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in the porous marine sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 5 081 ~ 5 096.
- [31] Kastner M. Gas hydrates in convergent margins: formation, occurrence, geochemistry and global sig-

- nificance[J]. American Geophysical Union Geophysical Monograph, 2001, 124: 67 ~ 86.
- [32] Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology, 2000, 167: 29 ~ 42.
- [33] Suess E, Torres M E, Bohrmann G, et al. Gas hydrate destabilization: enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin [J]. Earth and Planetary Science Letter, 1999, 170: 1 ~ 15.
- [34] Dickens G R, Paull C K, Wallace P, et al. Direct measurement of in situ methane quantities in a large gas hydrate reservoir [J]. Nature, 1997, 385: 426 ~ 428.
- [35] Takahashi H, Yonezawa T, Takedomi Y. Exploration for natural hydrate in Nankai Trough wells offshore Japan [J]. Journal of the Japanese Association of Petroleum Technology, 2001, 66: 652 ~ 665.
- [36] Hovland M. Are there commercial deposits of marine hydrates in ocean sediments? [J]. Energy Exploration and Exploitation, 2000, 18: 339 ~ 347.
- [37] Diaconescu C C, Kieckhefer R M, Knapp J H. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin, Azerbaijan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18: 209 ~ 221.
- [38] Kvenvolden K A, Ginsbury G D, Soloviev V A. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates [J]. Geomarine Letters, 1993, 13: 32 ~ 40.
- [39] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kupruk River area, North Slope, Alaska [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 793 ~ 812.
- [40] Collett T S, Kuuskraa D A. Hydrates contain vast store of world gas resources [J]. Oil and Gas Journal, 1998, 15: 90 ~ 95.
- [41] Milkov A V, Sassen R. Two dimensional modeling of gas hydrate decomposition in the northwestern Gulf of Mexico: significance to global change assessment [J]. Global and Planetary Change, 2003, 36: 31 ~ 46.
- [42] Grauls D. Gas hydrates: importance and application in petroleum exploration [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18: 519 ~ 523.

A review on formation mechanism and resources evaluation of marine gas hydrate

SUN Mei-qin, XU Mao-quan, XU Wen-bin, LEI Huai-yan
(Department of Oceanography/ Institute of Subtropical Oceanography,
Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The current advance in the studies on the formation mechanism of gas hydrate is reviewed in the paper. The gas hydrate is an unconventional natural gas mineral, whose formation and distribution depend upon the specific temperature and pressure conditions, and also the proper mineralized geological conditions, including sedimentary and structural environments, sufficient gas sources, valid migration channels, effective reservoirs and preserved conditions, *et al.* Thee-

valuation method of gas hydrate resources and some estimated values of methane gas hydrate in the world by foreign researchers are also introduced. The difference of several magnitude grades for those estimated values indicates that there is no reliable quantitative evaluation method of gas hydrate resources as yet.

Key words : marine resource ; formation mechanism ; review ; resource evaluation ; gas hydrate

www.cnki.net