

文章编号:0258-7106(2002)04-0414-05

# 冲绳海槽天然气水合物稳定带厚度的计算\*

方银霞<sup>1,2</sup> 申屠海港<sup>2</sup> 金翔龙<sup>2</sup>

(1 浙江大学地球科学系, 浙江 杭州 310027; 2 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘 要** 水合物稳定带(HSZ)的研究对天然气水合物的成矿与分布规律以及资源评价研究都具有重要的指导意义。文章根据天然气水合物的相平衡条件和相应的压力-温度方程,参照有关的几何算法,讨论了海底天然气水合物稳定带厚度的理论计算方法。并根据稳定带厚度的理论计算方法,在 Windows 中文平台上编制了简单实用的程序。利用该程序对冲绳海槽水合物稳定带的厚度进行了计算,并讨论了冲绳海槽水合物稳定带厚度的分布特征。

**关键词** 一次能源 天然气水合物 水合物稳定带 厚度 冲绳海槽

**中图分类号**: P744.4

**文献标识码**: A

天然气水合物是天然气和水分子组成的一种冰状的固态结晶体,在海洋中它主要分布于水深大于 500 m 左右的海底沉积物之中,依赖低温和巨厚水层造成的高压来维持其固体状态。天然气水合物仅在海底之下 500 ~ 1000 m 的范围内分布,再往深处则由于地热升温其固体状态遭破坏而分解。据国际天然气权威机构估计,全球天然气水合物的含碳总量达 1 016 kg 或含  $20 \times 10^{15} \text{ m}^3$  的甲烷气(MacDonald, 1990),相当于全球已知煤炭、石油和天然气等常规化石燃料总碳储量的两倍,所以天然气水合物被世人公认为是 21 世纪重要的后续能源。由于甲烷的温室效应以及天然气水合物在海底沉积物中的失稳作用可能造成的海底工程毁坏和一系列地质灾害,而引起世界各国政府和科学家越来越多的关注。近十几年来国际上对天然气水合物进行了广泛的科学研究,尤其是在资源量评估方面,许多沿海国家都非常迫切地想知道本国海域到底拥有多大的水合物资源量。目前估算海底天然气水合物中甲烷资源量一般均考虑天然气水合物分布的面积、水合物稳定带 HSZ(Hydrate Stability Zone)的厚度、沉积层的孔隙度、水合物在空隙中的浓度以及水合物分解甲烷的膨胀系数等因子,所以水合物稳定带厚度在天然气水合物资源评估中具有重要的意义(Xu et al., 1999; Milkov et al., 2000)。本文讨论了海底天然气水合物稳定带厚度的理论计算方法,在 Win-

dows 中文平台上编制了简单实用的程序,并计算了冲绳海槽海底天然气水合物稳定带的厚度。

## 1 计算原理与方法

许多气体(如乙烷、丙烷、二氧化碳等)都具有在较大的温度-压力范围内形成气水化合物的性能,以甲烷为主的天然气水合物的形成则需要更低的温度(0 ~ 10 °C)和更高的压力(1 ~ 10 MPa),在世界 90% 的海洋中某一深度以下都有天然气水合物稳定存在的温-压场,该温-压场就是天然气水合物稳定带的范围。水合物稳定带的厚度主要受控于水深,一般情况下,水深越大,稳定带厚度也越大,另外海底温度和地温梯度也是其重要的影响因子,因此在计算水合物稳定带厚度时,必须考虑水深、海底温度和地温梯度这三个重要参数。天然气水合物的相平衡条件和相应的压力-温度方程是计算海底天然气水合物稳定带 HSZ 厚度的理论基础。

天然气水合物的相平衡图如图 1 所示(Max, 1990)。相图显示海底天然气水合物平衡于天然气水合物、气体和水三相之间,由天然气水合物相边界曲线和假定的水热梯度曲线所包围的区域就是压力温度条件适合于天然气水合物形成的区域。相图中水热梯度曲线和天然气水合物相边界曲线的交点处对应于天然气水合物稳定存在的最小水深。在东海

\* 本文研究由国家重点基础研究发展规划项目(编号为 G20000467)资助

第一作者简介 方银霞,女,1970 年生,副研究员,在职博士生,现从事海洋地质和地球物理研究。

收稿日期 2002-02-11; 改回日期 2002-05-10。张绮玲编辑。

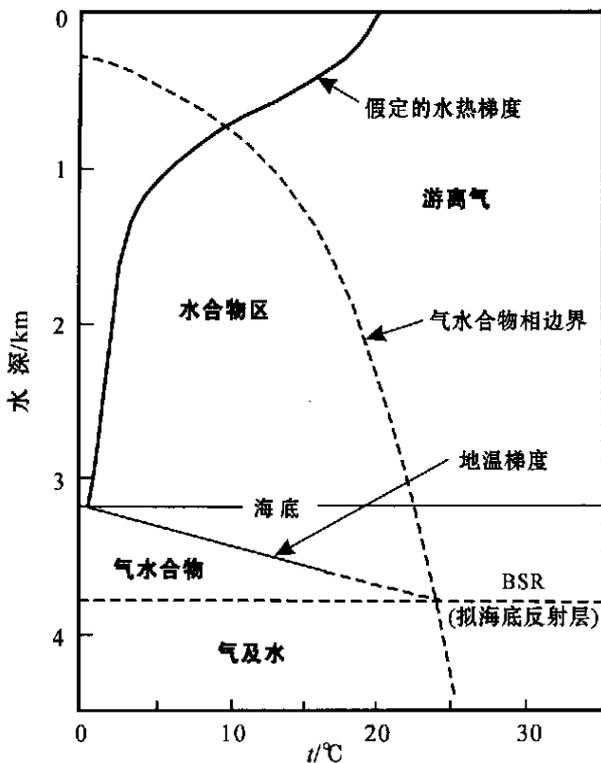


图 1 海底天然气水合物的相平衡图(据 Max,1990)  
 Fig.1 Phase diagram of methane hydrate in marine environment (after Max,1990)

深水陆坡与冲绳海槽海域,在水深超过600 m的情况下,天然气水合物稳定存在的条件基本可以得到满足。再往深处延伸会由于地热升温,天然气水合物固体状态遭破坏而分解。从相图上也可以看出天然气水合物在海底沉积物中保持稳定的厚度将取决于地温梯度的大小,如果地温梯度大,稳定带厚度就小;反之,地温梯度小,稳定带厚度就大。因此,可以根据天然气水合物相边界曲线和沉积物中的地温梯度曲线的交点来计算水合物稳定带 HSZ 底界沉积物的温度,再结合水深与海底温度等数据求取水合物稳定带的厚度。

Miles(1995)提出了关于天然气水合物稳定存在的温度-压力方程:

$$P = 2.8074023 + at + bt^2 + ct^3 + dt^4 \dots \dots (1)$$

其中:  $a = 1.559474 \times 10^{-1}$ ,  $b = 4.8275 \times 10^{-2}$ ,  $c = -2.78083 \times 10^{-3}$ ,  $d = 1.5922 \times 10^{-4}$ 。

利用海底温度( $t_0$ )和地温梯度( $g$ )的温度-水深公式:

$$t_z = t_0 + gZ \dots \dots \dots (2)$$

其中:  $t_z$  为水合物稳定带 HSZ 底界沉积物的温度,  $t_0$  为海底温度,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ,  $Z$  是海底到水合物

稳定带底界沉积层的厚度,单位为 m。

再根据压力  $P$  和深度  $D$  的转换关系:

$$P = [(1 + c_1) D + c_2 D^2] \times 10^{-2} \dots \dots \dots (3)$$

其中:  $P$  为压力,单位为 MPa。  $D$  为水合物稳定带底界所处的深度,单位为 m。  $D = Z_0 + Z$ ,包括水深( $Z_0$ )和海底到水合物稳定带底界的厚度( $Z$ )两部分,

$c_1 = [5.92 + 5.25 \sin^2(\text{lat})] \times 10^{-3}$ ,  $\text{lat}$  为纬度,单位为度;

$$c_2 = 2.21 \times 10^{-6}。$$

利用公式(2)得到海底到稳定带底界的厚度  $Z = (t_z - t_0) / g$ ,代入公式(3)得到公式(4):

$$P = \{ (1 + c_1) [Z_0 + (t_z - t_0) \Delta Z / \Delta t] + c_2 [Z_0 + (t_z - t_0) \Delta Z / \Delta t]^2 \} \times 10^{-2} \dots \dots \dots (4)$$

公式(4)就是沉积物中流体静力学的温度-压力关系的方程,结合 Miles 提出的公式(1)就可以建立水合物稳定带厚度的几何算法(Hanumantha,1999)。

根据上述原理得到的几何算法,用 C 语言编程加以实现,在 Windows 中文平台上完成了一个操作简单、运算方便的实用程序“天然气水合物稳定带厚度计算”。该程序根据用户的需要,可以输入单个的经度、纬度、水深、海底温度、地温梯度等值,经计算迅速得到该点位置的水合物稳定带厚度。也可以在文本编辑器中编辑一个包括经度、纬度、水深、海底温度、地温梯度 5 列数据的文本文件,通过程序计算,输出一个包括经度、纬度、水深、水合物稳定带底界温度、稳定带厚度 5 列数据的文本文件。选取该输出文件的经度、纬度、水合物稳定带厚度 3 列数据作网格化处理后,作出水合物稳定带厚度等深线分布图,这样可以直观地显示某研究海域天然气水合物可能的分布范围与水合物稳定带的厚度分布情况。

## 2 冲绳海槽水合物稳定带厚度的计算

冲绳海槽在地质构造上位于新生代环太平洋构造带西部边缘岛弧的内侧,属于太平洋沟、弧体系中的一个扩张型半深海弧后盆地。海槽呈北北东走向,其北部与日本天草褶皱带相联,南则插入台湾岛东部,南北长约 1200 km,东西宽约 100 km,海槽南深北浅,水深都在 600 m 以上,符合海底天然气水合物分布的基本条件。海槽基底由复杂变质的下第三系岩层和侵入体组成,上覆巨厚(4000 ~ 5000 m)的

第三纪晚期至第四纪沉积物,沉积物中有机质含量高;沉积岩类型主要为粘土质粉砂、粉砂质粘土、有孔虫-粉沙-粘土和泥。海槽内沉积速率也较高,而高沉积速率有利于沉积层中有机质的保存和转化,巨厚的沉积层、高有机质含量与合适的沉积岩类型都为水合物的形成提供有利的成矿环境。另外冲绳海槽经历了中新世末和上新世末两次构造运动,在其北部产生了一定规模的褶皱和冲断断层,上新世—更新世冲绳海槽南部的扩张活动则在其南部形成了相当多的年轻断层,这些断裂系统为烃类气流体的运移创造了有利条件(金翔龙,1992)。

综合分析冲绳海槽的构造背景和地质特征,发现只要在天然气水合物的稳定温压场海域内,除去一些如陡坡和裂谷等剥蚀区、火山分布区等,尤其是在海槽的西南坡,具备了天然气水合物稳定带分布的条件。Sakai 等人(1990)于1989年利用深潜器在冲绳海槽中部的 JADE 热液活动区黑烟囱附近发现流体气泡从海底冒出,所采气样主要含  $\text{CO}_2$  (约 86%),当气体溢出与温度为  $3.8\text{ }^\circ\text{C}$  的海水接触时立

刻析出气体水合物,并在喷气口处叠合成细管状,所形成的  $\text{CO}_2$  水合物管可达  $10\text{ cm}$  高。笔者通过地震资料的二次处理与解释也在海槽西北边坡的南部识别出天然气水合物存在的标志——拟海底反射层 BSR(方银霞等,2000),因此冲绳海槽的地质构造环境是有利于天然气水合物的形成与保存的。所以拟利用天然气水合物稳定带厚度计算程序对冲绳海槽海域的水合物稳定带厚度作理论上的计算,以探讨天然气水合物在该海域的分布特征。

由于天然气水合物稳定带厚度的计算需要地温梯度值,所以东海冲绳海槽区域水合物稳定带厚度计算的研究区域只能在地温梯度值已测海域内。限于论文篇幅,表1只列出了计算所用的部分数据(喻普之等,1992)。由于实测数据资料中缺乏相应的海底温度值,表1的海底温度数据主要根据中日黑潮调查研究中所测的几条水深剖面,分析表明海底的温度分布明显与海底水深有关,水深较浅,海底温度较高,水深较大,则海底温度较低。冲绳海槽区域水深较大,相对海底温度较低,基本保持在  $3\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$  之

表1 冲绳海槽天然气水合物稳定带厚度计算所用的部分数据

Table 1 Part of the data used in the computation of the Hydrate Stability Zone in Okinawa Trough

经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	水深/m	地温梯度 /( $^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )	地温梯度的 资料来源	海底温度 / $^\circ\text{C}$	稳定带底界 温度/ $^\circ\text{C}$	稳定带厚度/m
123.98	25.15	2151.45	0.039	Lu et al.,1981	4.00	19.26	391.16
124.15	25.27	2130.60	0.112	Lu et al.,1981	4.00	18.37	128.31
124.17	25.25	2234.23	0.056	Jessop et al.,1976	4.00	19.14	270.41
124.25	25.23	2292.37	0.194	Kinoshita,1989	4.00	18.72	75.90
124.35	25.27	2285.15	0.033	Kinoshita,1989	4.00	19.88	481.35
124.35	25.5	2293.54	0.052	Kinoshita,1989	4.00	19.39	296.00
124.40	25.18	2131.97	0.056	Kinoshita,1989	4.00	18.81	264.52
124.40	25.28	2268.59	0.054	Kinoshita,1989	4.00	19.28	282.99
124.42	25.20	2174.24	0.078	Kinoshita,1989	4.00	18.71	188.56
124.42	25.22	2222.67	0.058	Kinoshita,1989	4.00	19.08	259.95
124.42	25.23	2244.05	0.038	Kinoshita,1989	4.00	19.57	409.87
124.43	25.42	2076.27	0.110	Kinoshita,1989	4.00	18.19	129.00
124.47	25.12	2066.03	0.183	Kinoshita,1989	4.00	17.97	76.35
124.47	25.32	2153.97	0.182	Kinoshita,1989	4.00	18.28	78.47
124.48	25.08	2029.90	0.049	Kinoshita,1989	4.00	18.60	297.86
124.48	25.28	2296.21	0.066	Kinoshita,1989	4.00	19.21	230.43
124.48	25.03	2003.94	0.069	Kinoshita,1989	4.00	18.21	205.88
124.50	25.32	2163.30	0.040	Lu et al.,1981	4.00	19.26	381.55
124.60	25.27	2283.44	0.068	Kinoshita,1989	4.00	19.15	222.76
124.75	25.22	2281.67	0.055	Kinoshita,1989	4.00	19.31	278.29
124.78	25.72	2015.04	0.187	Yamano et al.,1987	4.00	17.78	73.70
124.82	25.63	2054.76	0.158	Yamano et al.,1987	4.00	17.98	88.45
124.83	25.53	2081.33	0.260	Yamano et al.,1987	4.00	17.95	53.64
124.85	25.38	2140.47	0.040	Lu et al.,1981	4.00	19.19	379.73
124.88	25.50	2076.55	0.222	Yamano et al.,1987	4.00	17.96	62.89

间,为方便起见,在计算中取其平均值  $4^{\circ}\text{C}$ 。

根据表 1 中的数据,利用天然气水合物稳定带厚度计算程序进行了运算,得出了冲绳海槽区域的水合物稳定带厚度,部分计算结果见表 1。对所获得的稳定带厚度数据进行了处理,网格化作图,得到冲绳海槽天然气水合物稳定带厚度分布等深线图(图 2)。

冲绳海槽水合物稳定带厚度分布图直观地显示了天然气水合物在冲绳海槽的空间分布特征,但由于所用的地温梯度数据并未涵盖整个海槽,所以只能讨论地温梯度值分布海域中天然气水合物的分布状况。从水合物稳定带厚度的分布来看,在  $123^{\circ}\text{E} \sim 128^{\circ}\text{E}$  和  $25^{\circ}\text{N} \sim 29^{\circ}\text{N}$  范围内的海槽区域都可能分布有天然气水合物,在该区域内稳定带厚度表现为南北两端厚中间薄的特征,海槽南部的的水合物稳定带厚度最大可达  $400\text{ m}$  以上,这与南部海槽的水深较大有关。中部的水合物稳定带厚度较小,厚度基本上在  $0 \sim 80\text{ m}$  范围内(图 2)。冲绳海槽是一个扩张初期的裂谷构造,地热流值较高,尤其在海槽的中部,分布有伊士名等现代海底热液活动区,这些热液

活动区的存在使地温梯度值较高,从而影响了天然气水合物稳定带的厚度,使海槽中部水合物稳定带的厚度比南北两端都薄。因此,尽管天然气水合物在冲绳海槽都有分布,但从勘探开发角度来看,海槽的南北部更具前景。

### 3 结 语

冲绳海槽的构造背景和地质特征表明,只要在天然气水合物的稳定温压场分布海域,除了少数陡坡、裂谷等剥蚀区和火山分布区等,尤其是在海槽的西坡,具备天然气水合物稳定带分布的有利条件(祝有海等, 2001)。冲绳海槽西坡的陆源补给丰富,自中新世以来沉积了巨厚的沉积层,而且沉积物中有机碳含量高,含  $\text{CO}_2$  和烃类的流体活动强烈,说明成矿物质也非常丰富,是天然气水合物分布的有利地区。本文根据天然气水合物的相平衡条件和相应的压力-温度方程,参照有关的几何算法,探讨了海底天然气水合物稳定带厚度的理论计算方法,并结合冲绳海槽的水深、海底温度、地温梯度等具体参数,计算和分析了冲绳海槽水合物稳定带的厚度分布特征。稳定带厚度计算结果也显示冲绳海槽西坡是水合物稳定带的潜在分布区,研究区的稳定带厚度表现为南北两端较厚中间较薄的特征,海槽南部的的水合物稳定带厚度由于所处水深较大可达  $400\text{ m}$  以上,中部的水合物稳定带可能受热液活动区的影响而较薄。

### References

- Fang Y X, Jin X L and Yang S F. 2000. Preliminary study of gas hydrate in the northwest slope of Okinawa Trough [ J ]. *Acta Oceanologica Sinica*, 22( Supp. ): 175 ~ 179 (in Chinese with English abstract) .
- Hanumantha Y R. 1999. C-program for the calculation of gas hydrate stability zone thickness[ J ], *Computers & Geosciences*, 25: 705 ~ 707 .
- Jessop A M, Hobart A and Skater J G. 1976. The world heat flow data collection-1975[ M ]. Ottawa: Geothermal Service of Canada .
- Jin X L. 1992. Marine geology of the East China Sea[ M ]. Beijing: Ocean Press . 303 ~ 333 (in Chinese) .
- Kinoshita M. 1989. Heat flow anomaly in some West Pacific T-A-BA system associated with interstitial water circulation( The Thesis of Doctor Degree)[ D ]. Tokyo: Tokyo University (in Japanese with English abstract) .

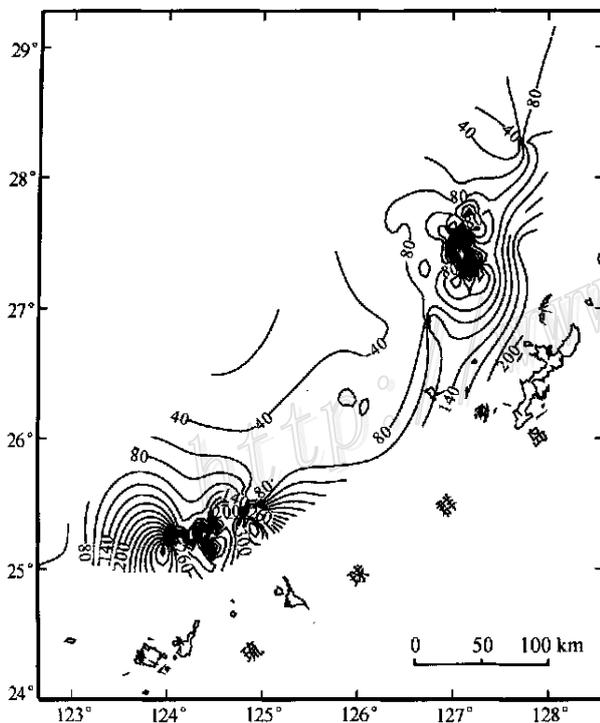


图 2 冲绳海槽天然气水合物稳定带厚度分布图(等值线上的数字单位为米)

Fig. 2 The potential thickness of Hydrate Stability Zone in Okinawa Trough(the unit of the number in the isoline is meters)

- Lu R S, Pan J J and Lee T C. 1981. Heat flow in the Southwest Okinawa Trough[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 55 :299 ~ 310 .
- MacDonald G J. 1990. The future of methane as an energy resource[ J ]. *Annual Review of Energy*, 15 :53 ~ 58 .
- Miles P R. 1995. Potential distribution of methane hydrate beneath the European continental margins[ J ]. *Geophysical Research Letters*, 22 (23) : 3179 ~ 3182 .
- Milkov A V and Sassen R. 2000. Thickness of the gas hydrate stability zone: Gulf of Mexico continental slope[ J ]. *Marine and Petroleum Geology*, 17 : 981 ~ 991 .
- Sakai H, Gamo T, Kim E S, et al. 1990. Venting of carbon dioxide-rich fluid and hydrate formation in Mid-Okinawa Trough backarc basin[ J ]. *Science*, 248 : 1093 ~ 1096 .
- Xu W and Ruppel C. 1999. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments[ J ]. *Geo-phys. Res.*, 104 : 5081 ~ 5096 .
- Yamano M, Uyeda S, Foucher J P, et al. 1987. Heat flow anomaly in the middle Okinawa Trough[ J ], *Tectonophysics*, 159 : 307 ~ 318 .
- Yu P Z and Li N S. 1992. Crustal heat flow of the East China Sea[ M ]. Beijing : Ocean Press . 57 ~ 73 (in Chinese) .
- Zhu Y H, Wu B H and Lu Z Q. 2001. The Prospecting for gas hydrate offshore china[ J ]. *Mineral Deposites*, 20(2) : 174 ~ 180 (in Chinese with English abstract) .

#### 附中文参考文献

- 方银霞, 金翔龙, 杨树锋, 等. 2000. 冲绳海槽西北边坡天然气水合物的初步研究[ J ], *海洋学报*, 22( 增刊) : 175 ~ 179 .
- 金翔龙, 主编. 1992. 东海海洋地质[ M ]. 北京: 海洋出版社. 303 ~ 333 .
- 喻普之, 李乃胜, 主编. 1992. 东海地壳热流[ M ]. 北京: 海洋出版社. 57 ~ 73 .
- 祝有海, 吴必豪, 卢振权. 2001. 中国近海天然气水合物找矿前景[ J ]. *矿床地质*, 20(2) : 174 ~ 180 .

## Computation of Thickness of Hydrate Stability Zone in Okinawa Trough

Fang Yinxia<sup>1, 2</sup>, Shentu Haigang<sup>2</sup> and Jin Xianglong<sup>2</sup>

(1 Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; 2 Key Lab of Submarine Geoscience, State Ocean Administration, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

### Abstract

The study of the hydrate stability zone (HSZ) is of great significance in that it is beneficial to the research of the deposition and the distribution features of marine gas hydrate ore, and also to the resource assessment of the marine gas hydrate. Based on the phase balance condition and the corresponding pressure-temperature equation of the gas hydrate, this paper has discussed the effects of such factors as the water depth, seafloor temperature and geothermal gradient on the deposition of marine gas hydrate. According to the relative geometric algorithm, it has also dealt with the theoretical computation method for the thickness of the hydrate stability zone based on the parameters of the water depth, seafloor temperature and geothermal gradient. A simple and practical program was worked out on the Windows Chinese platform according to the available computation method. Furthermore, this paper has analyzed the geological characteristics of Okinawa Trough, considering that Okinawa Trough has favorable mineralization condition for marine gas hydrate. So based on the specific parameters such as the water depth, seafloor temperature and geothermal gradient of Okinawa Trough, the authors used the program to compute the thickness of the hydrate stability zone in Okinawa Trough. The calculated results show that the Okinawa Trough, especially its west slope, is the potential area of the gas hydrate resource.

**Key words:** energy resource, gas hydrate, hydrate stability zone (HSZ), thickness, Okinawa Trough