

天然气水合物的 勘探与开发

蒋国盛 王 达 汤凤林
叶建良 邹华耀 倪晓阳 等

中国地质大学出版社



责任编辑: 方 菊
封面设计: 田剑云

ISBN 7-5625-1731-2



9 787562 517313 >

定价: 30.00元

中国地质大学(武汉)“211 工程”学术著作出版基金

国家自然科学基金项目:天然气水合物地层钻井的热压力特性研究(50174049)

中国地质调查局地质大调查项目:天然气水合物取样技术方案研究(200020160128)

资助出版

天然气水合物的勘探与开发

蒋国盛 王 达 汤凤林 叶建良 邹华耀 倪晓阳等

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

天然气水合物的勘探与开发/蒋国盛,王达,汤凤林,叶建良,邹华耀,倪晓阳等. —武汉:
中国地质大学出版社, 2002. 11
ISBN 7-5625-1731-2

I. 天…

II. ①蒋…②王…③汤…④叶…⑤邹…⑥倪…

III. 天然气水合物-勘探-开发

IV. P618

天然气水合物的勘探与开发

蒋国盛 王 达 汤凤林
叶建良 邹华耀 倪晓阳等

责任编辑:方 莉

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮编:430074

电话:(027) 87482760

传真:87481537

E-mail: cbo@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

开本:787毫米×1092毫米 1/16

字数:330千字 印张:12.75 图版:2

版次:2002年11月第1版

印次:2002年11月第1次印刷

印刷:中国地质大学印刷厂

印数:1—700册

ISBN 7-5625-1731-2/P·591

定价:30.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序 言

《天然气水合物的勘探与开发》已经由中国地质大学（武汉）、中国地质调查局、石油大学的老师和工程师们编著完成了，这是全国探矿工程界的一件大喜事，其将推动我国天然气水合物勘探与开发工程技术的广泛进步和发展。

直到 20 世纪 40 年代末，国内外科学界对天然气水合物的化学成分、物理结构以及其生成与赋存环境与条件等都知之不多。例如第二次世界大战结束后，在南美的百慕大地区不知何故引起了天然气水合物的巨量分解，造成了严重的海水汽化与海啸，使过路的大型船只沉没海底；由于严重的海啸产生的海水动荡和气流的负压，竟然将五架军用飞机吸入海内，无影无踪。此间，海上石油钻探处于初级阶段，对海域的天然气水合物认识不足，造成了天然气水合物的大量释放，施工海域的海水严重汽化，使数艘半潜式钻井平台、悬浮式钻井船相继倾覆。

20 世纪 60 年代以后，由于海上科学钻探技术的发展，特别是海上地球物理勘查技术的迅速发展。如长距离地震勘查、VSP（垂直地震剖面勘查）、BSP（海床剖面）方法的应用，在全世界范围的陆缘地区、海湾地区、大量发现的天然气水合物的赋存区域，引起了全世界科学家的关注和各国政府的大量投资，并开展研究工作。此后在北美的北部（美国与加拿大接壤处）以及俄罗斯北部永冻层地区也陆续发现了天然气水合物。

天然气水合物为人类带来了一种清洁的可持续发展的全新的能源，成为世界各国在能源战略平衡发展中必须加以考虑的重要因数。据日本有关专家估计，在地球上化石能源日益短缺（有的科学家估计只能再用 40a 左右）的今天，天然气水合物无疑给人类带来了一种新的绿色能源。据目前一些专家的估计，全世界天然气水合物的蕴藏量约为 $5 \times 10^{14} \text{m}^3$ ，相当于目前世界年能源消耗的 200 倍。据 1999 年 11 月日本资源能源厅调查，日本南部海沟的 $42\,000 \text{km}^2$ 范围内的天然气水合物的蕴藏量即为日本天然气消耗量的 1 400 倍。

中国钻探的历史已经有 2 500 多年，解放后，我国广泛开发了受控定向钻进技术，特别是双井对接井钻探技术，为我国开发天然气水合物创造了条件。

《天然气水合物的勘探与开发》广泛收集了有关天然气水合物的基础理论，海底天然气水合物勘查技术的各种方法，以及各主要工业国家的研究现状，这些宝贵的资料和信息无疑将促进我国对天然气水合物的人才培养、勘探与开发的进度。

深切希望这本著作早日面向读者，面向学生。

中国工程院院士

刘广志

2002 年 6 月 25 日

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 天然气水合物的特点	(1)
1.2 勘探开发天然气水合物的意义	(2)
1.2.1 作为化工燃料, 具有巨大的资源潜力	(2)
1.2.2 作为临界状态物质, 具有水下地质灾害的潜在诱因	(2)
1.2.3 作为有机碳库, 对全球气候变化产生重要影响	(3)
1.2.4 对古海洋研究的意义	(3)
1.2.5 对海洋军事技术研究的意义	(3)
1.3 国内外研究现状	(4)
1.3.1 国外研究现状	(4)
1.3.2 国内研究现状	(4)
1.4 海底天然气水合物勘查技术手段	(6)
1.4.1 地震地球物理探查	(6)
1.4.2 流体地球化学探查	(6)
1.4.3 微地貌勘测与海底视像探查	(6)
1.4.4 海底热流探查	(7)
1.4.5 海底地质取样与深海钻探	(7)
1.5 天然气水合物的识别标志	(7)
1.5.1 地震标志	(7)
1.5.2 地球化学标志	(8)
1.5.3 海底地形地貌标志	(8)
1.6 钻探取样和开采技术现状	(8)
1.6.1 钻探取样技术现状	(8)
1.6.2 开采技术现状	(9)
2 天然气水合物的物理化学性质和形成	(10)
2.1 天然气水合物的一般特征	(10)
2.1.1 天然气水合物的组成	(12)
2.1.2 气体中的水分	(13)
2.1.3 水在液态烃中的可溶性	(14)
2.1.4 气体在水中的可溶性	(15)
2.2 天然气水合物形成的条件	(15)
2.3 天然气水合物形成带	(17)
2.4 天然气水合物矿体形成过程和分布	(20)
2.5 天然气水合物物理化学和力学性质的试验研究	(25)
2.5.1 天然气水合物分解试验研究	(25)

2.5.2 深海甲烷水合物形成的野外试验	(28)
3 天然气水合物的勘查与识别	(30)
3.1 地球物理勘查技术	(30)
3.1.1 水平地震剖面 (BSR)	(30)
3.1.2 垂直地震剖面 (VSP) 和全波形反演速率	(31)
3.1.3 速度和振幅结构 (VAMPS)	(32)
3.1.4 测井	(32)
3.2 地球化学勘查	(36)
3.3 孔隙水的含盐度	(37)
3.4 海底地质活动	(38)
3.5 地质取样技术	(38)
3.6 旁侧声纳技术	(38)
3.7 天然气水合物甲烷量及资源量的计算	(39)
3.7.1 天然气水合物中甲烷量及资源量	(39)
3.7.2 天然气水合物中甲烷量计算	(39)
3.7.3 天然气水合物资源量的计算	(40)
4 海底表层地质取样技术	(42)
4.1 概述	(42)
4.1.1 海底表层地质取样的技术要求	(42)
4.1.2 海底取样器的分类	(42)
4.1.3 适用于海底取样器的岩石可钻性分级	(47)
4.2 非可控式海底柱状取样器的结构及工作原理	(47)
4.2.1 冲击式海底取样器	(47)
4.2.2 压入式和射入式取样器	(49)
4.2.3 吸入式取样器	(50)
4.3 控制式海底取样器的结构及工作原理	(52)
4.3.1 冲击打入式和振动式取样器	(52)
4.3.2 海底回转式取样器	(54)
4.4 浮球式海底取样器的结构及工作原理	(57)
4.4.1 浮球式海底取样器的整体结构	(57)
4.4.2 振动器及振动贯入原理	(57)
4.4.3 海上取样作业有关事项	(59)
4.5 柱状海底取样器的理论探讨及参数计算	(60)
4.5.1 柱状取样器取样时岩心形成过程的理论分析	(60)
4.5.2 对软地层取样时柱状取样器的参数计算	(62)
4.6 自返式冲击柱状取样器	(64)
5 天然气水合物钻探取心技术	(65)
5.1 概述	(65)
5.1.1 天然气水合物钻探应考虑的有关水合物层的基本条件	(65)
5.1.2 水合物井与传统海洋石油/天然气井的不同	(65)

5.1.3	水合物钻进的主要问题	(66)
5.1.4	钻进方法与对策	(66)
5.1.5	水合物层钻探的国内外现状	(72)
5.2	海上钻井平台	(72)
5.2.1	浮式钻井平台	(72)
5.2.2	浮式钻井平台的运动和控制	(73)
5.3	钻探取心器及其相关技术	(78)
5.3.1	保压取心器的主要技术指标	(78)
5.3.2	各类取样器的结构组成和取样工作原理	(78)
5.4	岩心恢复取样系统	(91)
5.5	钻井泥浆	(91)
5.5.1	防止钻进过程中天然气水合物再生成的抑制剂	(91)
5.5.2	钻进过程中天然气水合物的分解抑制	(94)
5.5.3	钻进过程中天然气水合物的诱发分解	(95)
6	深海和天然气水合物钻探技术	(97)
6.1	深海钻探工具与装备	(97)
6.1.1	升沉补偿装置	(97)
6.1.2	钻井隔水管	(101)
6.1.3	再入装备	(103)
6.1.4	完井工具	(108)
6.1.5	孔底温度测量工具	(114)
6.1.6	取心工具与岩心定向	(117)
6.1.7	原位流体取样	(122)
6.2	ODP164 航次天然气水合物钻探	(125)
6.2.1	科学目标	(125)
6.2.2	主要科学成果	(127)
6.2.3	典型孔位钻井程序	(129)
6.3	马更些三角洲天然气水合物钻探与开发试验	(131)
6.3.1	Mallik 2L-38 孔	(131)
6.3.2	Mallik 2002 年工作计划和进展	(134)
7	天然气水合物的开发技术	(138)
7.1	水合物的开采	(138)
7.1.1	水合物的开采特点	(138)
7.1.2	水合物的开采模型	(138)
7.1.3	海底水合物开发施工方法设想	(143)
7.2	水合物储运天然气技术	(144)
7.2.1	NGH 的制备、储存与分解条件研究	(144)
7.2.2	天然气水合物储存技术工艺及流程	(145)
7.3	天然气井管系中水合物的防堵与解堵	(148)
8	原苏联及其麦索雅哈气田天然气水合物矿藏	(150)

8.1	原苏联天然气水合物矿藏分布	(150)
8.2	麦索雅哈天然气水合物气田	(152)
9	中国天然气水合物形成条件和成矿前景	(158)
9.1	青藏高原天然气水合物形成条件和成矿前景	(158)
9.1.1	青藏高原地质构造概况	(158)
9.1.2	青藏高原多年冻土特征	(160)
9.1.3	青藏高原高山多年冻土区天然气水合物存在的可能性	(162)
9.1.4	羌塘盆地石油地质地球化学研究与评价	(164)
9.1.5	羌塘盆地藏北地区石油天然气地面地质调查与近地表油气地球化学勘探研究	(165)
9.1.6	结 论	(166)
9.2	南海天然气水合物形成条件和成矿前景	(167)
9.2.1	南海水合物成矿条件	(167)
9.2.2	南海水合物找矿标志	(168)
9.3	东海陆坡—冲绳海天然气水合物形成条件和成矿前景	(171)
9.3.1	冲绳海槽盆地水合物存在的区域地质条件分析	(172)
9.3.2	现有地震剖面的解释	(173)
9.3.3	冲绳海槽盆地卫星热红外增温异常	(175)
附录 1	美国能源部甲烷水合物研究计划简介	(176)
附录 2	美国国家甲烷水合物研究开发计划简介	(179)
附录 3	日本甲烷水合物研究与开发计划简介	(182)
附录 4	印度调查开发天然气水合物“九五”计划简介	(185)
附录 5	德国天然气水合物研究计划简介	(187)
参考文献		(191)
后 记		(194)
图 版		

1 绪 论

天然气水合物(Gas Hydrates)是由水分子和碳氢气体分子组成的具有笼状结构的似冰雪状结晶化合物。因其中气体分子以甲烷(CH_4)为主($>90\%$),故也被称为甲烷水合物或“可燃冰”。宏观上看,天然气水合物多呈白色或浅灰色晶体,见图版1,在深海海底其有多种产状:

- (1) 呈分散状胶结沉积物颗粒,见图版2(a);
- (2) 以结核状、弹丸状和薄层状的集合体形式赋存于沉积物或岩石中,见图版2(b)、(c)、(d);
- (3) 以细脉状充填于沉积物或岩石的裂隙中。

1.1 天然气水合物的特点

天然气水合物是一种储量巨大的、洁净的新型替代能源。

(1) 储量大。全球天然气水合物中的有机碳约占全球有机碳的53.3%,而煤、石油和天然气三者之和才占到26.6%。其中分布在陆地上的天然气水合物的最大地质储量约为 5.3×10^3 亿吨,分布在海洋中的最大地质储量约为 1.61×10^6 亿吨。仅海洋中的储量可满足人类需求1000多年。

(2) 能量密度大。天然气水合物是一种高密度的能源矿产。在标准状态下,它所含甲烷与水的体积之比为164:1,即每立方米固体水合物可释放出 $180 \sim 200 \text{m}^3$ 的甲烷气体。因而单位体积的气体水合物燃烧所能发出的热量远远大于煤、石油和天然气,为煤的10倍,传统天然气的2~5倍。

(3) 分布广。天然气水合物通常分布于三类地区:一是大陆架斜坡带、洋中脊、海沟和海岭等的海底沉积物中,约占全球天然气水合物总量的90%,矿体多呈层状和透镜状,单个矿体厚度为 $n \times 10 \text{cm}$ 、 $n \times (1 \sim 102) \text{m}$,甚至有1000m的不等,矿化面积可达 $n \times (104 \sim 105) \text{km}^2$,单个海域的天然气体资源量可达数万至几百万亿立方米;二是极地冻土带中;三是高寒地区的油气管道中,天然气水合物会阻塞管道而影响油气输送。已知除西伯利亚和北美北部的极地冻土带有气体水合物产出外,世界上已知气体水合物的绝大多数都产于大洋边缘,主要是太平洋东、西沿岸带、大西洋西海岸带,如图1-1。大西洋东岸、印度洋沿岸和北冰洋沿岸目前还发现得很少。随着工作程度的深入,还会增加许多产地。

(4) 形成条件。决定天然气水合物形成并稳定存在条件的基本因素有:有充足的气体和水存在,与气体成分、水的相状态、水的成分、温度和压力有关,如图1-2。天然气水合物是在低温($0 \sim 10^\circ\text{C}$)高压($>10 \text{MPa}$)下形成的,这种条件相当于大洋海水深度为300m处的条件。资料统计表明,冻土地区天然气水合物可在100m左右深度的浅层存在,最大可达1800~2000m,最常见的是700~1000m;一般说来,在海水深度为300~5500m距海底0~1000m深处的海底沉积物中存在。

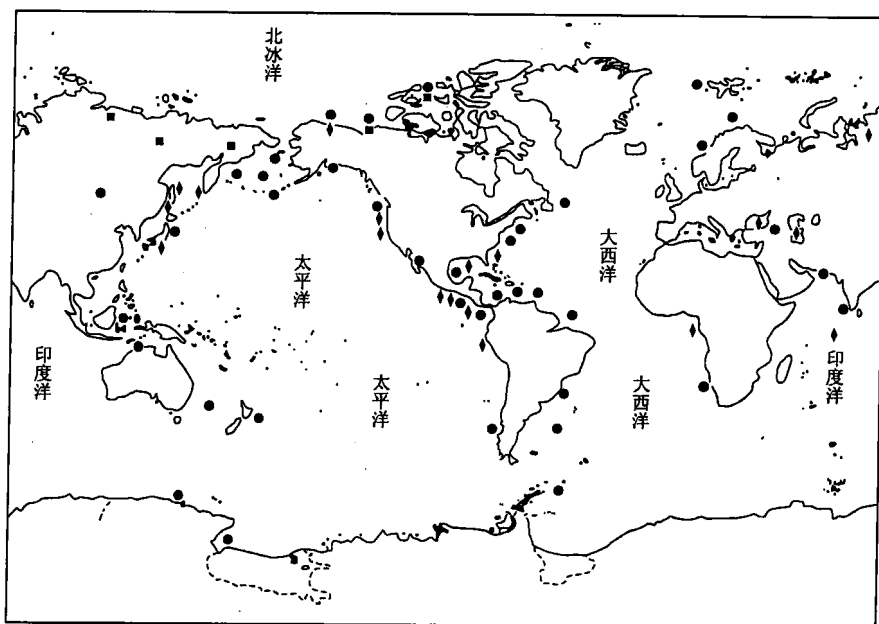


图 1-1 全球已知天然气水合物区分布图

●—海底沉积物中天然气水合物；■—永冻土地区天然气水合物；◆—已发现天然气水合物地区

1.2 勘探开发天然气水合物的意义

天然气水合物研究是当代地球科学和能源工业发展的一大热点。该研究涉及到新一代能源的探查开发、温室效应、全球碳循环和气候变化、古海洋、海洋地质灾害、天然气运输、油气管道堵塞、船艇能源更新和军事防御等，并有可能对地质学、环境科学和能源工业的发展产生深刻的影响。

1.2.1 作为化工燃料，具有巨大的资源潜力

参见 1.1 节。

1.2.2 作为临界状态物质，具有水下地质灾害的潜在诱因

天然气水合物的生成和分解都有可能产生灾害。

(1) 油气管道堵塞。在高寒地区，天然气水合物的生成可以堵塞诸如油井、油气管道等油气生产设施，从而构成灾害。

(2) 海底地质灾害。在海底，天然气水合物是极其脆弱的，轻微的温度增加或压力释放都有可能使它失稳而产生分解，从而影响海底沉积物的稳定性，甚至导致海底滑坡。相比而

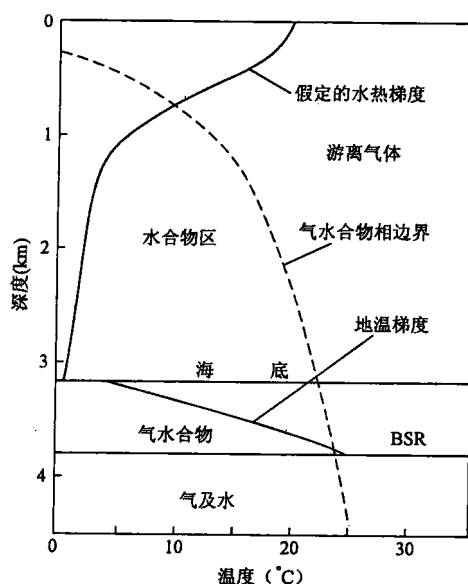


图 1-2 天然气水合物的压力(深度)-温度稳定区间图

言,天然气水合物稳定带是刚性层,之下是饱和气、水的沉积物塑性层。由于游离天然气聚集于天然气水合物稳定带的底界面,此处形成的压力可能超过孔隙压,使之成为一个脆弱的剪切带。一旦某种因素(如海平面下降、海底构造活动、海底热流值增高、钻井或采气不当)引起海底压力降低或温度上升,天然气水合物稳定带底界面的天然气水合物将有可能首先分解成天然气和水。其结果是:底界面处沉积物出现液化,气压不断增大,最终使上部的沉积层失稳而产生滑坡。如果巨厚的天然气水合物沉积层滑坡进入深海里,天然气水合物因压力释放而进一步大规模溶解。

自20世纪70年代起,在世界各大洋中发现数处由天然气水合物分解造成的海底地质灾害(海底滑塌、滑坡和浊流)。目前较为一致的认识是,这些海底地质灾害可能是由海平面升降、地震和海啸导致的天然气水合物分解而引起的,而天然气水合物分解产生的滑塌、滑坡和浊流则可能进一步引发新的地震和海啸。另外,在里海和巴拿马北部近海还发现天然气水合物分解产生的海底泥火山。

海底滑坡会对深海油气钻探、输油管道、海底电缆等海底工程设施构成危害。

(3)海水毒化。一旦海底天然气水合物因突发因素而失稳分解,大量的甲烷气体将进入海水,造成缺氧环境,进而引起海洋生物大量死亡,甚至导致生物绝灭。

1.2.3 作为有机碳库,对全球气候变化产生重要影响

甲烷是一种温室效应极强的温室气体。单分子甲烷蓄热能力是单分子 CO_2 的27倍,如以重量计,则甲烷的气候增温效应是 CO_2 的10倍。在正常情况下,大气中甲烷只占温室气体的15%,其对全球温室效应的影响排在 CO_2 之后。但是,全球天然气水合物中甲烷量占地球上甲烷总量的99%以上,大约是大气中甲烷量的3000倍。甲烷等从天然气水合物中释放,可导致全球气候迅速变暖,从而灾难性地威胁着人类生存环境。

1.2.4 对古海洋研究的意义

天然气水合物的分解是碳进入海洋的重要来源之一。尽管目前人们还不清楚碳通量对海洋化学会产生怎样的影响,但已经知道天然气水合物中碳同位素分馏程度非常高,水合物引起的碳通量任何微小变化都能改变人们对海洋中碳同位素升降的看法。碳同位素是人们早期研究古海洋、尤其是古气候的有效工具,今后如再用这种工具,就应充分考虑到水合物可能引起的影响。

1.2.5 对海洋军事技术研究的意义

通过试验,人们已经了解到天然气水合物以及天然气水合物胶结沉积物表层的声波速度是较高的,但对天然气水合物胶结沉积物的特殊声学特征还不是很清楚,需要进一步研究。海洋天然气水合物可能对海军使用的声学模型产生影响,并可能造成判断失误。掌握天然气水合物胶结沉积物的特殊声学特征,对声纳仪器的正确运用具有重要意义,美国海军非常重视这一点,并积极参与海洋天然气水合物的声学性质研究。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外研究现状

从1810年英国Davy在实验室首次发现气水合物以来,人类就再没有停止过对气水合物的研究和探索,但此后的120多年中的各项研究仅停留在实验室。1934年,人们发现输气管道内形成天然气水合物,给天然气的输送带来很大的麻烦,人们开始研究在工业条件下天然气水合物的预报和消除等。

直到1960年苏联在开发麦索亚哈气田时,首先在地层中发现了天然气水合物矿藏,而后,美国也在阿拉斯加北部的永冻层中取出含有天然气水合物的岩心,这两大重要发现表明极地、大陆永冻层中有天然气水合物,人们开始把天然气水合物作为一种燃料进行研究,并推动全球天然气水合物研究,即跨入了把天然气水合物作为一种能源进行全面研究和实施开发的崭新阶段。

美国、加拿大、俄罗斯、日本等十几个国家联合实施了大洋钻探(ODP)和深海钻探(DSDP)计划,相继在鄂霍茨克海、墨西哥湾、大西洋和太平洋北美沿岸、南海海槽等14处采集到了水合物样品。迄今为止,已在世界上60多个地区发现有气水合物显示。

20世纪90年代,美国地质调查所和能源部开展了全美海洋天然气水合物研究计划,对阿拉斯加和北卡罗滨岸带进行了天然气水合物勘探和评价。1994年,俄罗斯对勘察加半岛南部和千岛群岛北段进行了天然气水合物详查。1995年印度为了改变高价格、长距离从国外进口石油和天然气的局面,几个部门和专家委员会联合向政府提出印度国家天然气水合物研究开发5年计划,政府大力支持,并预投资5600万美元启动这一计划。1996年日本政府设立专项计划,拟投资1.5亿美元,于1999年试钻探、开采日本南海海槽的甲烷气体水合物资源。挪威也在1996年底对挪威海槽北部大陆斜坡的7个海洋深水区天然气水合物进行了地质调查和勘探。1996年至1999年间,德国和美国科学家通过深潜观察和抓斗取样,在美国俄勒冈州岸外Cascadia海台的海底沉积物中取得海底出露样品,见图版3。这一系列活动表明,气体水合物的研究、勘探、开发工作正在步步走向深入。

近年来,许多国家把探明本国天然气水合物资源和做好开采准备列入能源对策的重要目标,投入巨资,成立专门的研究机构。美国成立了天然气水合物研究中心;1995年日本成立了甲烷水合物开发促进委员会,制定了1995—1999年的五年勘探计划,并准备在2000年进行开发;加拿大于1998年组织有美国和日本等25位科学家参加的陆地天然气水合物钻探和开发技术研究。

通过30年的努力,全世界已在天然气水合物的结构和性质、天然气水合物地质学、工程地质学、地球化学、地球物理勘探、工业生产中天然气水合物的预报和清除及与全球气候变化的关系等领域取得了丰硕成果。

1.3.2 国内研究现状

我国拥有绵长的海岸和滨海大陆架斜坡带、海岭、海沟、海槽和广泛分布的永久冻土带(如青藏高原,占全球1/10),具有形成天然气水合物有利的地质地理环境。

21世纪中国能源的短缺,特别是油气资源的匮乏是我们面临的不可避免的事实。而城市

燃煤所带来的环境污染与恶化不仅为民众所关切，也引起行政当局的高度重视。尽管中国能源消费结构（国内外能源结构对比见表1-1）中以煤为主的格局不是短期内所能改变的，但是为了国民经济的可持续发展。这种格局必须改变，为实现这种改变，必须加大

油气在一次性能源消费中的比重，而目前我国原油消费早已不能完全自给而靠进口补充（实际已进入石油进口大国的行列），因此天然气水合物的勘探与开发可能是实现上述改变比较可行的方案。

我国自20世纪80年代末开始对天然气水合物方面的研究工作。我国尽管还没有专门立项进行研究，参加研究的单位和科技工作者的数量也为数不多，但已有一些部门完成了一系列的前期调研报告，并向政府有关部门提出了立项建议。1997年中国地质科学院矿床研究所完成了“西太平洋气体水合物找矿前景与方法的调研”课题——“863”计划海洋探查与资源开发技术（820）主题。1999年10月，广州海洋地质调查局实施了“南海北部西沙海槽气体水合物前期调查”项目，完成高分辨率多道地震500多千米，获得了近130km的BSR显示剖面，如图1-3。2000年中国地质大学（武汉）承担了中国地质调查局“天然气水合物取样技术方案研究”课题研究。同年，中国地质科学院勘探技术研究所承担了国土资源部对天然气水合物保压取样器的立项研究。

表 1-1 1999 年我国与世界能源结构对比

能源构成	石油	天然气	煤炭	核电	水电
中国	26.3%		68.0%	0.4%	5.3%
世界	40.0%	23.1%	27.2%	7.2%	2.5%

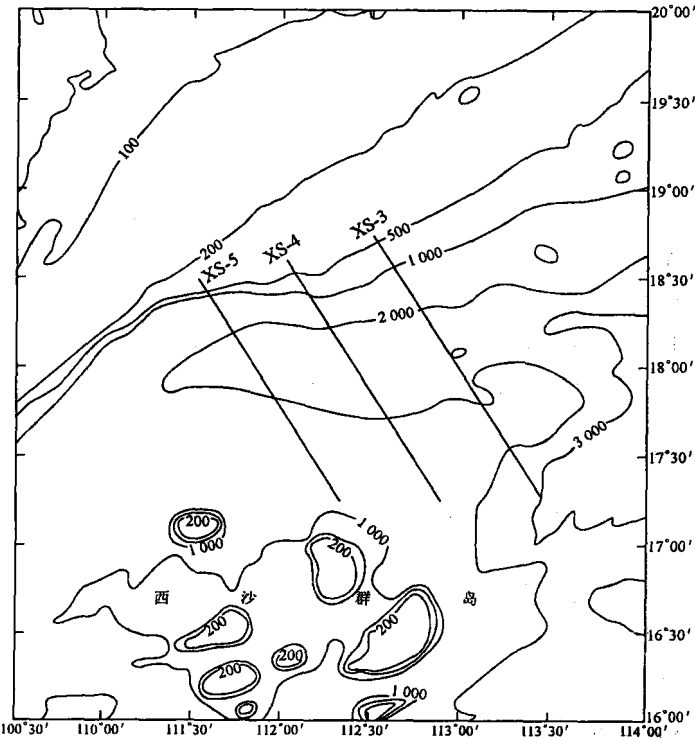


图 1-3 1999 年 10 月广州海洋地质调查局工作区测线布置图
(XS-3、XS-4、XS-5 线)

根据前期勘探和历史勘探资料初步分析,我国天然气水合物成藏远景区为:南海海区、青藏高原冻土区、东海部分海域、台湾海峡。据推测,我国南海资源量可达700亿吨。

探明我国天然气水合物的赋存条件、资源量,研究钻探取样和开采工艺,将为我国宏观能源决策提供重要依据,对增加科技积累、开辟新学科领域、缩短与世界先进水平的差距,具有重要理论意义,对寻找保护和改善人类生存环境的途径、协调人类与自然界的关系、保障人类社会持续发展具有重要影响。

1.4 海底天然气水合物勘查技术手段

目前,天然气水合物调查的技术手段较多,如地震地球物理探查、电磁探测、流体地球化学探查、海底微地貌勘测、海底视像探查、海底热流探查、海底地质取样、深海钻探等,但这些技术手段都不够成熟,有待进一步探索和完善。

1.4.1 地震地球物理探查

对于沉积物中的天然气水合物,声波 P 波和 S 波都很灵敏。对于沉积物中少量的天然气水合物而言, S 波可能比 P 波更灵敏。地震调查正是利用了天然气水合物的这一声学特征。

地震地球物理探查包括高频共深点法地震探查和高频地震剖面探查。高频地震剖面探查是天然气水合物的主要调查手段。地震地球物理探查可以有多种技术方法,如船载深水高分辨率数字地震方法、船载单道地震方法、大孔径海底地震检波法、垂直地震剖面法等。这些方法的理论依据与声纳技术基本相同。

多道地震方法是探测深海天然气水合物的常用技术方法,也是目前最有效的技术方法。它是利用强脉冲声源(如气枪排阵)和许多道接受器探测来自海底、次海底地质界面的反射信号。这种方法的特点是数字记录、分辨率高,但费用高、探测埋深不大。

单道地震反射法是美国、加拿大探测深海天然气水合物的技术方法之一,但不常用。它是利用强脉冲声源(如气枪)和单通接受器探测来自海底、次海底地质界面的反射信号。这种方法的特点是探测深、分辨率低、费用少。

海底地震检波法是在海底安置大孔径地震检波器,接受来自次海底地质界面的反射信号。垂直地震剖面法是在钻井的不同深度安置地震检波器。这些方法的分辨率很高,费用也很高,主要用来估算天然气水合物的富集率和评价天然气水合物资源量。

1.4.2 流体地球化学探查

在海洋环境中,天然气水合物富集区烃类气体的微量渗逸可在海底沉积物、海底和海水中形成烃类异常或其他异常效应。通过对地质沉积样孔隙水(或间隙水)及近海底水样(尤其是富气羽状流)的测试,分析甲烷浓度异常、 Cl^- 含量异常、 $\delta^{18}\text{O}$ 异常、pH等地球化学指标和富含重氧的菱铁矿等标志矿物,探测与天然气水合物有关的地球化学异常,圈定天然气水合物可能存在的地球化学异常区。

1.4.3 微地貌勘测与海底视像探查

通过船载深水多波束技术及海底电视摄像技术,探测海底地形地貌,分析并圈出与天然气水合物可能有关的特殊构造(可视为天然气水合物的地貌标志)的分布范围。

1.4.4 海底热流探查

采用海底热流探测技术,测定海底温度,计算地温梯度。目的是:分析天然气水合物成藏条件;反演天然气水合物稳定层底界面的埋深。

1.4.5 海底地质取样与深海钻探

地质取样技术是发现天然气水合物的直接手段,也是验证其他方法所得调查成果的必要手段。地质取样技术,包括抓斗取样、重力取样(柱样)、大型重力活塞密封取样等海底浅地层取样技术(深度达10~12m)和深海钻探取心技术。地质取样的另外目的是:分析天然气水合物产状及赋存方式;测试天然气水合物中气体成分及其有关成因参数[如 $Cl/(Cl+C_2)$] 比值、甲烷中 $\delta^{13}C$ 值、硫化氢的 $\delta^{34}S$ 值等;计算天然气水合物的充填率;估算天然气水合物的资源量。

1.5 天然气水合物的识别标志

天然气水合物可以通过地质沉积物取样、钻探取样和深潜考察等方式直接识别,也可以通过似海底反射层(BSR)、速度和震幅异常结构、地球化学异常、多波速测深与海底电视摄像等方式间接识别。下面介绍一些间接标志。

1.5.1 地震标志

海洋天然气水合物存在的主要地震标志有似海底反射层(BSR)、振幅变形(空白反射)、速度倒置、速度-振幅异常结构(VAMP)。大规模的甲烷水合物聚集可以通过高电阻率($>100\Omega \cdot m$)声波速度、低体积密度等信号进行直接判断。

BSR 是地震剖面上的一个平行或基本平行于海底、可切过一切层面或断层的反射界面。图版4为 ODP164 航次 Site994/995/997 的 BSR,天然气水合物稳定带之下还常圈闭着大量的游离甲烷气体,从而导致在地震反射剖面上产生 BSR。现已证实,BSR 代表的是天然气水合物稳定带的基底,其上为固态的天然气水合物层段,声波速率高,其下为游离气或仅为孔隙水充填的沉积物,声波速率低,因而在地震剖面上形成强的负阻抗反射界面。因此,BSR 是由于低渗透率的天然气水合物层与其下大量游离天然气及饱和水沉积物之间在声阻抗(或声波传播速度)上存在较大差别引起的。因为天然气水合物层的底界面主要受所在海域的地温梯度控制,往往位于海底以下一定的深度,因此,BSR 基本平行于海底。BSR 除被用来识别天然气水合物的存在和编制天然气水合物分布图外,还被用来判明天然气水合物层的顶底界和产状,计算水合物层深度、厚度和体积。

然而,并不是所有的水合物都存在 BSR。在平缓的海底,即使有天然气水合物,也不易识别出 BSR。BSR 常常出现在斜坡或地形起伏的海域。另外,也并不是所有的 BSR 都对应有天然气水合物。在极少数情况下,其他因素也可能导致 BSR。还应注意的是,尽管绝大部分天然气水合物层都位于 BSR 之上,但并不是所有的天然气水合物层都位于 BSR 之上,这已被深海钻探证明。因此,BSR 不能被作为天然气水合物的唯一标志,应结合其他方法综合判断。

近几年,分析和研究地震的速度结构成为该学科领域的前沿。天然气水合物层是高速层,其下饱气或饱水层是低速层。在速度曲线上,BSR 界面处的速度会出现突然降低,表现出明

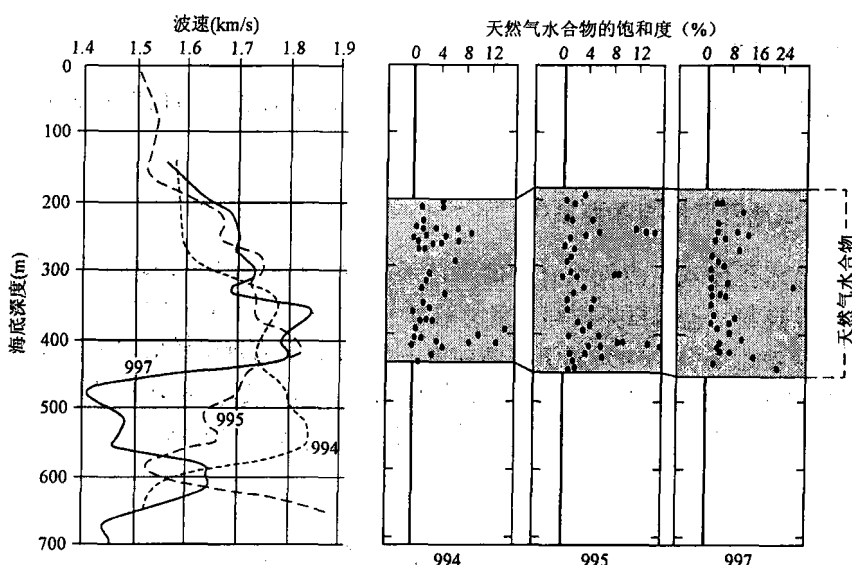


图 1-4 ODP164 航次 site994/995/997 的波速异常及天然气水合物的埋藏深度

显的速度异常结构，如图 1-4。此外，分析振幅结构也可识别天然气水合物。相比而言，天然气水合物层是刚性层，其下饱气或饱水层是塑性层，在振幅曲线上，BSR 界面处的振幅会出现突然减小，表现出明显的振幅异常结构。这些方法对海底平缓的海域来说，尤其显得重要。

1.5.2 地球化学标志

浅层沉积物和底层海水的甲烷浓度异常高、浅层沉积物孔隙水 Cl^- 含量（或矿化度）和 $\delta^{18}\text{O}$ 异常高、出现富含重氧的菱铁矿等，均可作为天然气水合物的地球化学标志。

1.5.3 海底地形地貌标志

在海洋环境中，天然气水合物富集区烃类气体的渗逸可在海底形成特殊环境和特殊的地形地貌。天然气水合物的地貌标志主要有泄气窗、甲烷气苗、泥火山、麻点状地形、碳酸盐壳、化学合成生物群等。在最近几年，德国基尔大学 Geomar 研究所通过海底观测，在美国俄勒冈州西部大陆边缘 Cascadia 海台就发现了许多不连续分布、大小在 5cm^2 左右的水合物泄气窗，泄气窗中甲烷气苗一股一股地渗出，渗气速度为 $5\text{L}/\text{min}$ 。在该渗气流的周围有微生物、蛤和碳酸盐壳。

1.6 钻探取样和开采技术现状

1.6.1 钻探取样技术现状

由于天然气水合物的亚稳定性，以及其地理环境的恶劣，给钻探取样和开发利用带来很大困难。文献资料表明，许多国家已通过钻探取出了原状天然气水合物样本，但是，在实验室至今还未能取得可用于实验、分析的样品，这主要是因为全球还未能解决在室内营造既能保持天然气水合物的稳定，又能允许实验人员对其进行实验、分析的实验环境问题。另外，现