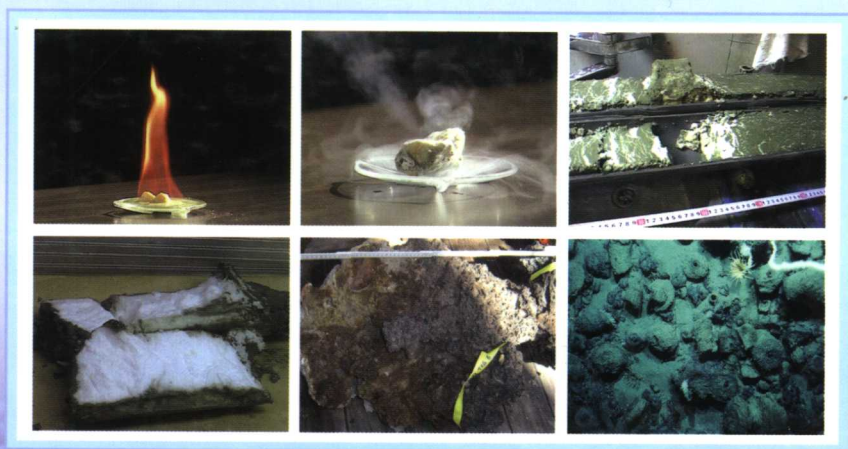


天然气水合物资源概论

金庆焕 张光学 杨木壮 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com

天然气水合物资源概论

金庆焕 张光学 杨木壮 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

水合物广泛分布于深海区的浅表层沉积物中和永久冻土带,分别占水合物总量的 98%和 2%。据初步估算,水合物中甲烷的碳总量远远超过煤、石油和天然气的碳总量,因此被认为是继石油和天然气之后的主要替代能源。

本书全面系统地收集并综合了国外大量有关水合物的调查和研究成果。首先深入讨论水合物形成的地质构造背景、稳定域和温压条件;系统总结了水合物赋存区的微地貌、喷溢口附近的生物群落、自生碳酸盐岩及表层地球化学特征;深入剖析了水合物的成矿机理,并对水合物的形成、分布及资源评估进行了综合论述。

本书可供从事地质、矿产、自然资源等专业的科技人员及管理人员参考使用,也可作为高校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气水合物资源概论/金庆焕等编著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017203-5

I. 天… II. 金… III. 天然气水合物-资源-概论 IV. P618.130.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 044011 号

责任编辑:韩 鹏 彭胜潮 李久进 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006 年 9 月第一次印刷 印张:11 1/4

印数:1—1 500

字数:250 000

定价:120.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

参加编写人员名单

金庆焕	张光学	杨木壮
陈 强	王宏斌	陈 芳
陶 军	付少英	梁金强

序

天然气水合物,也称可燃冰或固体甲烷。

天然气水合物具有能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅等特点,故引起许多国家、有关组织及科学家的高度关注。按理论计算,在标准条件下,1m³ 饱和天然气水合物可释放出 164m³ 的甲烷气体,是其他非常规气源岩(诸如煤层、黑色页岩)能量密度的 10 倍,是常规天然气能量密度的 2~5 倍。因此,天然气水合物是迄今所知的最具价值的海底能源矿产资源,其巨大的资源量和诱人的开发利用前景使它很有可能在 21 世纪成为煤、石油和天然气之后的替代能源。

天然气水合物的分解是海底地质灾害的重要诱发因素,现已查明,世界各大陆边缘许多海底滑塌、滑坡和浊流作用,都与海底天然气水合物分解有关。另外,天然气水合物释放出的甲烷还是一种重要的温室效应气体,甲烷的温室效应问题已成为国际上的一个前沿课题而受到人们的高度重视。因此,无论从寻找战略后备能源的角度出发,还是从灾害防治和维护人类生存环境的方面考虑,天然气水合物研究均具有重要意义。

近 30 年来,西方各国已开展了大量针对天然气水合物的调查与研究,对天然气水合物的成矿条件、分布规律、形成机理、勘查技术、经济评价、环境效应与环境保护等方面进行了较为系统的研究。相比之下,我国在这一领域的研究和调查起步较晚,大约落后西方 30 年。20 世纪 80~90 年代,国土资源部、中国科学院、教育部等有关单位的科学家陆续开展了有关天然气水合物的国外情报调研。1999 年,在国土资源部中国地质调查局部署下,广州海洋地质调查局利用高分辨率多道地震调查手段,率先在南海北部大陆坡西沙海槽区发现了天然气水合物存在的重要地球物理证据——似海底反射波(BSR),拉开了我国天然气水合物资源调查的序幕。2002 年初,国务院正式批准设立了“我国海域天然气水合物资源调查与评价”专项,旨在利用地质、地球物理、地球化学和钻探等多学科的先进技术手段,调查与评价我国海域的天然气水合物资源状况。

为系统了解国际上有关天然气水合物先进的调查研究与评价的技术方法及研究成果,2001 年 5 月,中国地质调查局设立院士科研基金项目“海域水合物地质找矿方法及成矿远景前期研究”(编号:2001-YSJJ-G/H)。近 20 名年轻科技人员在金庆焕院士的带领下,从天然气水合物形成条件与成矿机理,天然气水合物分布区的海底浅表层地质与地球化学异常特征,天然气水合物资源量评估及资源前景等方面,开展全面、系统、深入、细致的调研与分析,并及时应用到南海北部大陆坡天然气水合物资源调查与研究工作中,为顺利实施和出色完成国家水合物专项任务提供先进理论、方法参考与指导,取得明显的效果。

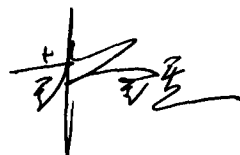
《天然气水合物资源概论》是上述院士基金项目研究成果的升华和结出的硕果,主要内容包括天然气水合物形成的地质背景、天然气水合物稳定域及其温压条件、天然气水合物喷溢口的生物群落和自生碳酸盐岩、天然气水合物的地球化学研究、天然气水合物成矿

条件与成矿机理、天然气水合物甲烷资源量评估方法及全球水合物资源前景等。

《天然气水合物资源概论》是我国目前不可多得的、系统的关于天然气水合物地质找矿理论与方法研究的文献,可贵之处还在于该专著中有研究我国天然气水合物的首批系列成果,是研究我国天然气水合物的处女性专著。相信该专著的出版,对推动我国海洋天然气水合物的调查研究,寻找战略储备能源,丰富天然气水合物的地质成矿理论,具有重要的科学意义。该力著的出版是可喜可贺的,值得一读,故推荐给大家,读后定会获益匪浅。

天然气水合物研究和勘探是一项朝阳事业,其因有二:一是目前世界能源,尤其是油气紧缺,而据估算天然气水合物资源是现在已探明化石燃料(煤、石油和天然气)总含碳量的2倍,故其潜力是朝阳般地诱人;二是无论是国内还是国外,天然气水合物研究和勘探均处于起始阶段,有众多问题待解决,众多规律待发现,更多的天然气水合物矿藏待探明,故从事此项研究和勘探,有取得朝阳般成果的机遇。

中国科学院院士



目 录

序	
绪论	1
第一章 天然气水合物形成的地质构造背景	7
第一节 主动大陆边缘天然气水合物形成的地质构造背景	7
第二节 被动大陆边缘天然气水合物形成的地质构造背景	20
第二章 天然气水合物形成的温压条件及其稳定域研究	32
第一节 天然气水合物形成的温压条件	32
第二节 基于水合物信息的地热流计算方法	35
第三节 天然气水合物稳定域研究	42
第三章 天然气水合物赋存区的微地貌、生物学和矿物学特征	53
第一节 天然气水合物赋存区的微地貌特征	53
第二节 天然气水合物喷溢口的化能自养生物群落	60
第三节 与天然气水合物喷溢有关的自生碳酸盐岩	66
第四章 天然气水合物的地球化学研究	76
第一节 天然气水合物的结构特征和气体成因	76
第二节 与天然气水合物有关的烃类气体丰度异常	83
第三节 沉积物孔隙水的组成及异常分析	90
第四节 自生碳酸盐岩的稳定同位素特征	100
第五章 天然气水合物成矿条件与成矿机理	104
第一节 含天然气水合物的沉积物特征	104
第二节 天然气水合物的气源条件分析	110
第三节 天然气水合物成矿机理	115
第六章 天然气水合物甲烷资源量评估方法	124
第一节 天然气水合物资源评价中的技术方法	124
第二节 天然气水合物资源量计算方法	140
第三节 天然气水合物资源前景述评	151
主要参考文献	159

绪 论

石油和天然气是目前世界各国的主要能源,在整个能源结构中占 61.8%。随着经济和社会的发展,对石油和天然气的需求将进一步增长,但石油和天然气作为不可再生资源终将枯竭。为开辟新能源,近 30 年来,许多国家已把目光投向一种鲜为人知的新型能源——天然气水合物的调查和开发利用的研究。

一、水合物的发现、调查和研究简况

早在 1778 年,英国化学家在实验室就发现了含二氧化硫的水合物,1811 年 Davey 又发现了含氯气的水合物。

进入 20 世纪,美国科学家 Hammersemidt 于 1934 年首次在输气管道中发现有水合物堵塞了管道,影响了气体的输送。

水合物主要由天然气与水组成,呈固体状态,其外貌极像冰雪或固体酒精,点火即可燃烧,因此有人称其为“可燃冰”、“气冰”、“固体瓦斯”。

水合物的笼形结构是由原苏联科学院院士尼基丁于 1936 年首次提出的,并被沿用至今。在水合物的笼形结构中普遍存在空腔或孔穴,其间充填烃类和二氧化碳、硫化氢等气体。水合物的分子式为 $M \cdot nH_2O$,式中, M 为甲烷等气体; n 为水分子数。

在西伯利亚冻土带的 27 个油气田中,均发现有水合物。1965 年,原苏联在西伯利亚麦索亚哈气田首次发现了水合物矿藏,并引起世界各国科学界的关注。

麦索亚哈气田的含气层为上白垩统赛诺曼阶砂岩。水合物矿层赋存于气田的上部砂岩和泥岩中,其埋深约为 750~850m,水合物的饱和度为 20%~40%。早在 1970 年,原苏联科学家在该气田的水合物矿层中注入甲醇,促使水合物分解,然后回收甲烷。

1927 年克里米亚大地震期间,附近的黑海海面出现高达数百米的“火焰山”,当时认为这与海底硫化氢上升燃烧有关。1996 年,俄罗斯在克里米亚半岛东南海域进行水合物调查;2002 年,德国、俄罗斯和乌克兰科学家利用包括海底深潜器等手段,对黑海水合物进行联合科学考察。考察中发现在黑海水深 260~1950m 海底,存在高出海底数米的堆积物,并不断冒气泡,在其周围形成死菌层;在多处海底断裂带附近有甲烷气释放,一昼夜最高释放达 $17 \times 10^4 m^3$ 。考察资料表明,在黑海海底以下 60~650m 深处,初步发现有 150 多个水合物矿点,水合物矿层厚达 5~6m。从 20 世纪 80 年代以来,原苏联利用海底取样和地震调查,先后在里海、贝加尔湖、鄂霍次克海等水域发现了水合物。

1972~1974 年,美国、加拿大在阿拉斯加北部、马更些河三角洲冻土带相继发现了大规模的水合物矿藏。其中,加拿大帝国石油公司 1972 年在钻探 Mallik L-38 井时发现了水合物。加拿大及附近海域赋存丰富的水合物:在马更些河三角洲——波弗特海,利用 200 多口石油探井的测井资料发现 29% 的钻井钻遇水合物,其矿层平均厚度 82m;在北极群岛的斯沃德鲁普盆地的 168 口石油探井中,约 52% 的钻井见水合物,其矿层平均厚度

65m;在大西洋边缘的戴维斯海峡等陆架区的 48 口探井中,有 26 口钻井见水合物,其矿层平均厚度 79m;在太平洋活动边缘(即卡斯凯迪亚大陆斜坡的北端)应用似海底反射波(BSR)圈定的水合物分布范围内,推测其矿层厚度约 110m。

1974 年,美国地质调查局通过地震调查,在布莱克海台发现 BSR,并在深海钻探计划(Deep Sea Drilling Program,DSDP)第 75 航次 533 号钻孔中获得水合物样品,从岩芯中释放出大量甲烷气,从而证实了似海底反射波与水合物有关,BSR 是水合物存在的重要地球物理标志。

1979 年,深海钻探计划第 66、67 航次在中美洲海槽的钻孔岩芯中发现了水合物。

德国从 20 世纪 80 年代开始,利用“太阳号”调查船与其他国家合作,开展东太平洋的俄勒冈海域、白令海、南沙海槽和苏拉威西海水合物调查,均发现了与水合物有关的地震标志。值得指出的是,早在 1984 年“太阳号”船 SO49、SO98 航次在南海的南沙海槽东南部,于水深 1500~2800m 处海底以下 300~600m 的沉积层中发现了 BSR;在苏拉威西海北部俯冲带的增生楔的上、下坡内发现 BSR。

据统计,截至 2004 年底,世界海洋(包括少数内陆深水湖盆)已有 107 处海域间接或直接发现了水合物,多数由 BSR 解释确定,其中 20 处由 DSDP 和大洋钻探计划(Ocean Drilling Program,ODP)钻探及浅表层取样获得水合物岩芯,8 处通过钻井测井发现。

二、水合物专项调查及资源前景

20 世纪 90 年代以来,美国、日本、印度、德国、韩国等已先后实施了水合物专项调查和研究计划。

1995 年冬,为进一步了解布莱克海台水合物矿藏的特征,ODP 专门组织了为期 3 个月的第 164 航次调查,并完成 994、995、997 钻孔,钻探揭示含水合物层位于海底以下 190~450m。

鉴于水合物中甲烷资源的巨大潜力,美国参议院能源委员会于 1998 年 5 月通过了一个为期 10 年的“水合物研究与资源开发计划”。其内容包括资源详查、生产开发技术、水合物开发对全球气候变化的影响、环境与安全以及海底稳定性等五方面的问题,拟每年投入资金 2000 万美元,要求 2010 年达到计划目标,2015 年投入商业开发。

20 世纪 70 年代后期,日本在南海海槽开展地震调查,发现了 BSR(或双 BSR)。80 年代末,ODP127、131 航次在日本周缘海域进行钻探,并获得了水合物样品。这一发现促使有关部门制定了 1995~1999 年宏伟的水合物研究计划,共投资 6400 万美元,该计划包括水合物的物理化学基础研究、重点海域的地质地球物理靶区调查和开发的实验钻探等内容。截至 1999 年,日本石油公团已在日本的南海海槽完成 6 口钻井,其中 2 号井在海底以下 150~300m 处发现了 3 层(厚度分别为 3m、5m、7m)水合物矿层。

日本 21 世纪甲烷水合物研究协会(临时合作勘探组织“MH21”)制定了 3 个阶段的日本南海海槽的水合物开发试验方案:第一阶段(2001~2006 年),2002 年已在南海海槽完成 1960km² 的三维地震,计划完成 16 口水合物多井钻探,主要任务是圈定水合物富集区,评价其资源量,并为今后部署生产开发井提供依据;第二阶段(2007~2011 年),进行开发试验及相应的生产技术、环境影响和经济评估;第三阶段(2012~2016 年),完成水合物商业性开发的经济和环境评价。

印度科学和工业委员会制定了 1996~2000 年的“全国水合物研究计划”,共投资 5600 万美元。迄今为止,印度已在其东、西海域发现了多处水合物的地球物理标志,并编制了印度海域的水合物分布图及有利远景区。据报道,在安达曼海发现一个很大的水合物远景区,今后将进一步开展地震详查,争取选择 3~5 个可供钻探的靶区。

德国采用“太阳号”调查船配合 ODP 计划,参与美国、加拿大太平洋东部的“主动大陆边缘水合物研究项目”、“欧洲北大西洋边缘(ENAM)项目”、“黑海水合物调查”和“欧洲大陆边缘气和水流体项目”以及西伯利亚永冻层的水合物矿藏系统研究等,计划每年投入 250 万马克。

韩国燃气公司(KOGAS)研究开发中心从 2000 年开始执行为期 5 年的水合物国家研究项目,主要开展地震调查,研究水合物的特性及其开发技术。2000 年 4~5 月,该公司开始在韩国东海(郁陵盆地)8325km² 海域进行地震调查。初步结果显示,该海域极有可能富集大量水合物。2001 年 5 月又进行了第二次勘探。

水合物的甲烷资源量一直是科学家关注的重要问题,20 世纪 80 年代,据原苏联和美国的专家估算,在世界海洋中有利于形成水合物的海区面积约为 $1.89 \times 10^9 \text{ km}^2$,水合物的甲烷资源量为 $3.1 \times 10^{15} \sim 7.6 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 。另据国际天然气潜力委员会估算,世界海洋中水合物的甲烷总资源量约为 $1.8 \times 10^{16} \sim 2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。90 年代,科学家认为在水深 200~3000m 的海底能形成水合物的总体积为 125 万 km³,海底水合物中的甲烷资源量为 $2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。因此,普遍认为水合物中甲烷的碳总量大致相当于全世界已知煤、石油和天然气等化石燃料中碳总量的 2 倍。而俄罗斯的 Soloviev 和日本的佐藤干夫两位学者分别认为,全球海洋水合物甲烷资源量仅为 $1.8 \times 10^{14} \sim 1.0 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 和 $1.94 \times 10^{14} \text{ m}^3$ 。

据初步调查结果,布莱克海台水合物中甲烷资源量为 $35 \times 10^{12} \text{ m}^3$,在水合物矿层之下的游离气资源量大约为 $35 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可满足美国 105 年的天然气消耗;阿留申和鲍尔斯盆地的水合物中甲烷资源量为 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$;阿拉斯加北侧普拉德霍湾的水合物中甲烷资源量为 $1.0 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

经初步估算,日本四国海槽水合物甲烷资源量为 $2.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$,游离气资源量为 $1.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

经乌克兰、俄罗斯和德国专家综合考察后认为,黑海水合物的甲烷资源量为 $2 \times 10^{13} \sim 2.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。

据 Makogon 于 2000 年估算,印度陆缘水合物的甲烷资源量约为 $40 \times 10^{12} \sim 120 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

美国俄勒冈外海のカス凯迪亚增生楔形成的海脊(又称水合物脊)是活动陆缘水合物调查的一个热点。1992 年,ODP 146 航次在该区完成了一批钻井,并钻遇了水合物。ODP 204 航次在该海域完成 9 口钻井(钻井编号为:1244、1245A、1245B、1247、1248、1249、1250、1251 和 1252),钻井揭示,位于海底以下 20~50m 含有丰富的水合物。此外,还见到多处海底甲烷冷泉、直接出露海底的水合物(水合物脊由此而得名)和高达 50m 的自生碳酸盐岩“冰塔”。根据深拖旁侧声呐显示,自生碳酸盐岩内存在面积约 300m×500m 的声波散射区,这可能直接与水合物的甲烷渗透有关。

2001~2003 年,加拿大、美国、日本和德国等七国,在 Mallik 冻土带实施水合物开发试验计划。先后完成 Mallik 3L-38、Mallik4L-38 和 Mallik 5L-38 三口钻井,其中后两口井均钻遇水合物层,Mallik 5L-38 被确定为生产试验井(井深 1113.7m)。经 100 多位科

学家的综合研究,对该井的浅、中、深层烃类气体成因和组成,以及在降压、加热条件下水合物矿层物性特征和饱和度等方面取得了新的认识。应用最新的斯仑贝谢模块动力测井仪,对该井的3个水合物层段进行了测试,获得了瞬时压力值、水合物饱和度变化造成的多相流体半径和时间、相对渗透率和系统压缩率的变化,以及关井期间因水合物持续分解增加的游离气等重要数值信息。

三、水合物形成的地质条件及成藏机制

充足的气源、适当的温压条件和地质构造环境是水合物形成的必要条件。因此在主动陆缘、被动陆缘和内陆深水湖盆的浅表层沉积中,均可赋存水合物。

根据水合物中甲烷的碳同位素组成、甲烷与乙烷和丙烷总量之比例关系,可判断生物气和热解气。若甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 小于 -60‰ , $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8)$ 之比大于1000,则为生物气;反之,则为热解气。

墨西哥湾巨型盆地中,新生界厚达20km,其中中侏罗统盐层厚度为500~4000m,是著名的盐底辟发育区。里海、黑海、鄂霍次克海、挪威海、格陵兰南部海域和贝加尔湖则是著名的泥火山发育区。由于底辟作用,来自深层的热成因烃类气体向上迁移,在浅表层及海底形成水合物。采自这些海区的多数水合物样品,烃类气体具有较重的碳同位素($\delta^{13}\text{C}$ 达 -38‰)就是其证据。

水合物形成的最佳温度是 $0\sim 10^\circ\text{C}$,压力则应大于 $1.01\times 10^7\text{Pa}$ 。在极地和高纬度海域,因其温度较低,无需太高的压力即可形成水合物。如阿拉斯加、加拿大和俄罗斯北部的永久冻土带及附近陆架海底均可形成水合物。在海域由于水层的存在使压力相应增加,水合物可在较高的温度条件下形成,通常在水深300~2000m处(压力为30~200atm^①),温度 $25\sim 15^\circ\text{C}$ 时,水合物仍然可以形成并稳定存在,其成藏上限为海底面,下限位于海底下650m左右,甚至可深达1000m。

Matveeva于2002年认为,等深流作用强的海区,一般是水合物的有利富集区。这是因为,等深流沉积具有颗粒较粗、物性好、气源充足和有利流体运移等特点。据估计,在被动大陆边缘,由于重力流作用,每年可释放出约100万 m^3 的气体。布莱克海台含水合物沉积可能与等深流作用有关。

海域水合物主要赋存于上新统和第四系的各种粗细碎屑岩沉积中,其孔隙中水合物含量最高可达95%。

目前地质界对水合物的成藏机制知之甚少,俄罗斯科学家魏尔巴·米·列和吉斯布尔克·格·捷初步提出了如下一些观点。

水合物形成取决于烃类气体进入沉积层的速度(用 V_1 表示)和烃类气体与孔隙水一起冻结的速度(用 V_2 表示)。

在水合物成藏的早期阶段,由于烃类气体的供给有限,且不均匀,所以在地震剖面上形成了不均一的反射层。如 $V_1 > V_2$,烃类气体未能完全及时与孔隙水冻结形成为水合物,尚有较多烃类气体赋存于地层中,此时有些地震波能量被烃类气体所吸收,在地震剖面上局部出现“声波哑区”,不能将这类“声波哑区”误认为一般的振幅空白带(BZ)。

^①大气压(atm)为非法定单位,1atm= $1.013\ 25\times 10^5\text{Pa}$ 。

随着水合物进一步成藏,沉积层中出现一些含水合物的“岛屿”,当这些含水合物“岛屿”连成一体,横向形成连续的水合物稳定带时,其底界就出现较连续的BSR。但是,地热条件变化和断裂构造活动等因素会引起地层温度和压力变化,导致水合物稳定带底部发生分解,烃类气体向上运移至新的稳定带,即形成所谓的“水合物对话圈”,因此BSR常呈动态变化。

四、我国水合物研究和调查现状

我国在这一领域的研究和调查起步较晚,大约落后西方约30年。20世纪80~90年代,地质矿产部、中国科学院、教育部等有关单位的科学家较系统地翻译和收集了国外有关水合物的调查和科研成果,为在我国海域开展水合物调查做了资料和技术准备。

根据国土资源部中国地质调查局的统一部署,广州海洋地质调查局于1999~2001年,率先在我国南海北部陆坡的西沙海槽区开展了高分辨率多道地震调查(作为我国水合物“118”调查专项的前期航次)。尔后,于2002年正式启动了“我国海域天然气水合物资源调查与评价”国家专项。近几年分别在南海北部陆坡的西沙海槽、东沙海域、神狐暗沙附近和琼东南海域,进一步开展水合物调查,共完成7个航次。总共完成各项调查工作量为:高分辨率多道地震测线20 047.1km;浅地震剖面7127.27km;多波束测深21 024.5km;海底摄像245个站位;地质取样652个;热流测量41个站位。

为执行好“118”专项,联合高校及科研院所协同攻关,特设立以下3个配套科研项目,分别为:①“我国海域天然气水合物资源调查及开发技术研究”;②“我国海域天然气水合物开发的环境效应研究”;③“我国海域天然气水合物资源综合评价及勘探开发战略研究”。中国地质调查局广州海洋地质调查局,青岛海洋地质研究所,中国地质科学研究院矿产所,教育部所属的中国地质大学、南京大学,中国科学院地质地球物理所,以及国家海洋局等单位的科学家分别参与相关的科研工作。

调查所取得的主要成果为:在上述海域均发现多处似海底反射波和振幅空白带;存在大量的地球化学异常,主要是顶空气的烃类异常、孔隙水 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度与同位素异常;发现多处冷溢气口、碳酸盐结壳、菌席和双壳类等。以上调查成果表明,在调查区浅层沉积物中存在水合物。

最近刚结束的中、德联合水合物科考,取得了重要进展。根据海底电视观测发现,在东沙海域存在由于水合物气体“冷泉”喷溢形成的面积约 430km^2 的碳酸盐结壳(定名为“九龙甲烷礁”),以及与甲烷“冷泉”相应的双壳类生物、管状蠕虫和菌席等,根据同位素测年数据,其形成时间约在距今4.67万年前。

根据中国地质调查局关于院士科研经费的安排,2001年广州海洋地质调查局设立院士科研基金项目。其目的是吸引广州海洋地质调查局年轻的科技人员,系统地收集和深入研究国外有关水合物调查与科研的主要成果,为更好地实施国家水合物专项提供理论和技术方法指导。

院士基金项目分设6个课题,课题名称及参与人员见表0.1。2003年,广州海洋地质调查局地勘科技处组织有关专家对6个课题成果进行评审。我们现以6个课题研究成果为基础,进行了适当的综合、归并、调整和提升,以专著的形式公开出版。专著首先讨论水

表 0.1 院士基金项目各专题及研究人员名单一览表

序号	课题名称	主要研究人员
课题一	天然气水合物赋存区的微地貌方法研究及环境意义	陶军、盛堰、张锦炜
课题二	天然气水合物赋存区的生物群落及矿物学特征研究	陈芳、王群、陆红锋、李扬、廖志良、刘广虎
课题三	天然气水合物地球化学研究	付少英、赵祖斌、刘坚、梁劲、陈道华、陆红锋
课题四	天然气水合物地温场特征及稳定域(HSZ)研究	王宏斌、吴庐山、吕万军、杨木壮
课题五	天然气水合物成藏条件及成矿机理研究	杨木壮、张光学、沙志彬、付少英、龚跃华
课题六	天然气水合物资源量评估方法及成矿远景研究	梁金强、郭依群、沙志彬

合物形成的地质构造背景和温压条件,然后分析水合物赋存区的海底浅表层微地貌、生物群落、矿物及地球化学特征,最后论述了水合物的成矿机理和甲烷资源量评估。本书共分六章:第一章天然气水合物形成的地质构造背景,由张光学和陈强编写;第二章天然气水合物形成的温压条件及其稳定域研究,由王宏斌编写;第三章天然气水合物赋存区的微地貌、生物学和矿物学特征,由陈芳和陶军编写;第四章天然气水合物的地球化学研究,由付少英编写;第五章天然气水合物成矿条件与成矿机理,由杨木壮编写;第六章天然气水合物甲烷资源量评估方法,由梁金强编写。金庆焕负责专著的章节安排、撰写绪论,并与张光学、杨木壮一起共同完成统稿和定稿。陈强为本专著的编辑,并负责出版工作。在院士基金项目实施过程中得到广州海洋地质调查局总工程师黄永样等技术领导的帮助和指导,在此深表谢意!

第一章 天然气水合物形成的地质构造背景

水合物主要分布在主动和被动大陆边缘的加积楔顶端、陆坡盆地、弧前盆地、陆坡海山,乃至内陆海或湖区,尤以主动陆缘俯冲带增生楔区和被动陆缘的陆隆台地断褶区水合物最为发育。前者如南设得兰海沟、秘鲁海沟、中美洲海槽、俄勒冈滨外、日本南海海槽、中国台湾西南近海等。后者有著名的布莱克海台、墨西哥湾路易斯安那陆坡、加勒比海南部陆坡、亚马孙海底扇、阿根廷盆地、印度西部陆坡、尼日利亚滨外三角洲前缘等。这些地区水合物的分布与海底扇、海底滑塌体、台地断褶区、断裂构造、底辟构造、泥火山、“梅花坑”地貌等特殊地质构造环境密切相关,具有水合物成矿的有利地质构造环境。

第一节 主动大陆边缘天然气水合物形成的地质构造背景

自 20 世纪 60 年代以来, DSDP/ODP/IODP 组织为探讨主动陆缘的运动过程、动力作用机制及变形结果,分析构造地层格架,研究物质结构及深部地质,先后在东、西太平洋和印度洋等主动陆缘进行了多次科学探查活动,在取得丰硕地质科学认识的同时,也获得了一份意外的收获——发现水合物新能源。目前,利用地震探测技术,在世界上大多数增生楔中都已发现了水合物(表 1.1)。

一、主动陆缘深水区水合物分布特征

(一) 主动陆缘地质结构特征

主动陆缘由沟-弧-盆系组成,洋壳下插至陆壳之下,大洋板块沉积物被刮落下来,堆积于海沟的陆侧斜坡形成增生楔(图 1.1)。

增生楔又称俯冲杂岩或增生楔形体,是主动陆缘的一种主要构造单元,沿板块活动边界发育深海沟,靠陆一侧由多个逆冲岩席组成复合体,在其后发育有沉积型弧前盆地,两者构成陆坡。当大洋板块、海沟中的物质在板块俯冲过程中被刮落下来,通过叠瓦状的冲断层或褶皱冲断等各种机制附加到上覆板块,沿海沟内壁构成的复杂地质体。高精度的地震探测技术显示增生楔内广泛发育叠瓦状冲断层和褶皱,其结构类似于陆上的褶皱冲断带。俯冲增生的方式包括刮落作用(offscraping)和底侵作用(underplating)。前者指俯冲板块上的沉积层沿基底滑脱面被刮落下来,通过叠瓦状冲断作用添加于上覆板块或已增生物质的前缘。底侵作用则是指俯冲物质从上覆板块与俯冲板块之间楔入,添加于上覆板块或增生楔的底部,它导致增生楔逐渐加厚并抬升。

也就在上述增生楔地区的浅地层内发现了水合物地震标志——BSR。水合物在活动陆缘的加积楔顶端、陆坡盆地、弧前盆地等地区广泛分布。尤以主动陆缘俯冲带增生楔区水合物最为发育,表明该区具有较好的水合物成矿环境。

表 1.1 世界海域增生楔中发现的水合物一览表

地区	增生楔位置	构造背景	发现方式	发现组织(国家)	发现时间
东太平洋地区	南设得兰海沟东南侧	南极板块内的菲尼克斯微板块向东南俯冲至南设得兰板块之下	识别 BSR	澳大利亚	1989~1990 年
	智利西海岸 智利三联点附近	纳兹卡板块、南极洲板块俯冲至南美洲板块之下	识别 BSR, 并经钻探证实	ODP 组织	ODP141 航次
	秘鲁海沟	太平洋板块俯冲于南美洲板块之下	获取水合物样品, 后重新处理地震资料, 识别 BSR	ODP 组织	1986 年 (ODP112 航次)
	中美洲海槽区		钻遇水合物, 后识别 BSR	DSDP 组织、美国得克萨斯大学海洋科学研究所	1979 年
	北加利福尼亚陆缘岸外	门多西诺断裂带北部板块聚敛	识别 BSR, 并于海底地球化学岩样中见水合物	美国地质调查局	1977 年、1979 年、1980 年
	俄勒冈滨外	卡斯凯迪亚俯冲带南延部分	识别 BSR, 后经 ODP 钻探证实	美国迪基肯地球物理勘探公司、ODP 组织	1989 年、1992 年 (ODP146 航次)
	温哥华岛外	卡斯凯迪亚俯冲带南延部分	识别 BSR, 后经 ODP 钻探证实	美国迪基肯地球物理勘探公司、ODP 组织	1985~1989 年、1992 年 (ODP146 航次)
西太平洋地区	日本海东北部北海道岛滨外	菲律宾板块向西北方向俯冲	钻遇水合物, 后经地震资料处理, 识别 BSR	ODP 组织	1989 年 (ODP127 航次)
	日本南海海槽	菲律宾板块向西北方向俯冲	钻遇水合物, 后经地震资料处理, 识别 BSR	ODP 组织	1990 年 (ODP131 航次)
	台湾碰撞带西南近海	南中国海洋壳向东俯冲于吕宋岛弧之下	识别 BSR	中国台湾	1990 年、1995 年
	苏拉威西海北部及西里伯海周边	西里伯海洋壳在苏拉威西海西北部海沟处俯冲至苏拉威西岛之下	识别 BSR	德国与印度尼西亚在西里伯海执行的地质科学调查计划 (GIGICS) SO 第 98 航次	1998 年
印度洋地区	印度洋西北阿曼湾莫克兰近海	阿拉伯板块、印度洋板块向北俯冲至欧亚板块之下, 形成自霍尔本兹至卡拉奇的东西向俯冲带	识别 BSR	英国剑桥大学贝尔实验室	1981 年

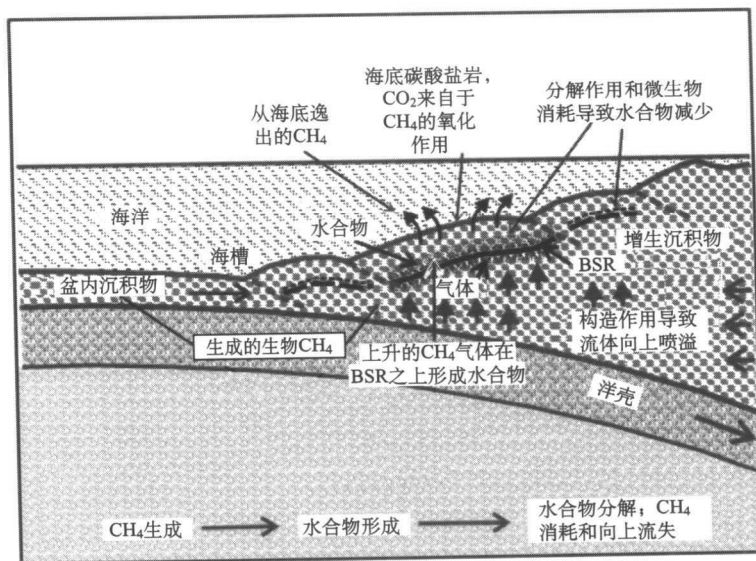


图 1.1 主动陆缘增生楔内气体迁移与水合物 BSR 形成关系略图
(Hydman et al., 1992, 修改)

(二) 东太平洋地区水合物分布特征

东太平洋海沟俯冲带南起南设得兰海沟,北迄俄勒冈,为全球构造中著名的构造活动带,是典型的活动陆缘,已成为世界各国地质学家颇感兴趣的研究地区。自南部的南设得兰海沟往北经智利西海岸外的智利三联点附近连接秘鲁海沟、中美洲海槽区、加利福尼亚边缘至俄勒冈滨外及温哥华岛外的卡斯凯迪亚俯冲带海沟东侧陆坡盖层之下均有增生楔发育,是主动陆缘地区水合物发育的理想场所。

上述地区存在水合物已经大洋钻探得到证实。如在智利三联点附近,ODP 第 141 航次钻孔(859 井)于海底之下 100m 处见有水合物,与 BSR 深度吻合;秘鲁海沟地区 688 号钻孔于 BSR 之上多套地层发现了水合物,井震对比结果十分理想;中美洲海槽区,DSDP 第 66 航次所完成的 20 口钻孔中有 9 口钻孔见水合物;俄勒冈滨外钻探井(892)穿过 BSR 及断层,在 BSR 之上 2~17m 处见有大块晶体的水合物。有些地区海底地球化学探查也证实了地震资料推论的结果,如北加利福尼亚边缘加积体及弧前新生代沉积盆地(伊尔河盆地)74 个岩样中有 7 个见有水合物。

这里以温哥华岸外陆坡区卡斯凯迪亚水合物脊为例予以分析。

1. 温哥华岸外陆坡区卡斯凯迪亚水合物脊的地质构造背景

20 世纪 80 年代末,卡斯凯迪亚俯冲带因美国西北部太平洋沿岸地震对人类造成灾害及作为研究增生楔环境流体流动影响的天然实验室而被人类社会广泛关注。

沿卡斯凯迪亚边缘,由于年轻的胡安·德·富卡大洋板块以大约 45mm/a 的速度向东北与北美大陆的勘探者(Explorer)板块(美国西北部和加拿大西南部近海)正向碰撞,俯冲于北美大陆之下。在胡安·德·富卡海脊体系附近形成洋壳,伴生有向陆倾斜的逆

冲和隆升作用,向大陆下俯冲侵入的胡安·德·富卡板块上大约 3km 厚的浊积岩和半远洋沉积物被刮落下来,堆积于海沟的陆侧斜坡,形成一系列近平行展布的增生楔(图 1.2),同时沿增生楔发育多条逆冲断层、张性破裂面及伴生褶皱。逆冲断层朝陆倾斜,沿构造走向构造样式发生变化,变形前缘过渡处被北西向的左旋走滑断层切割,该断层从变形前缘的深海平原一直延伸至陆架。

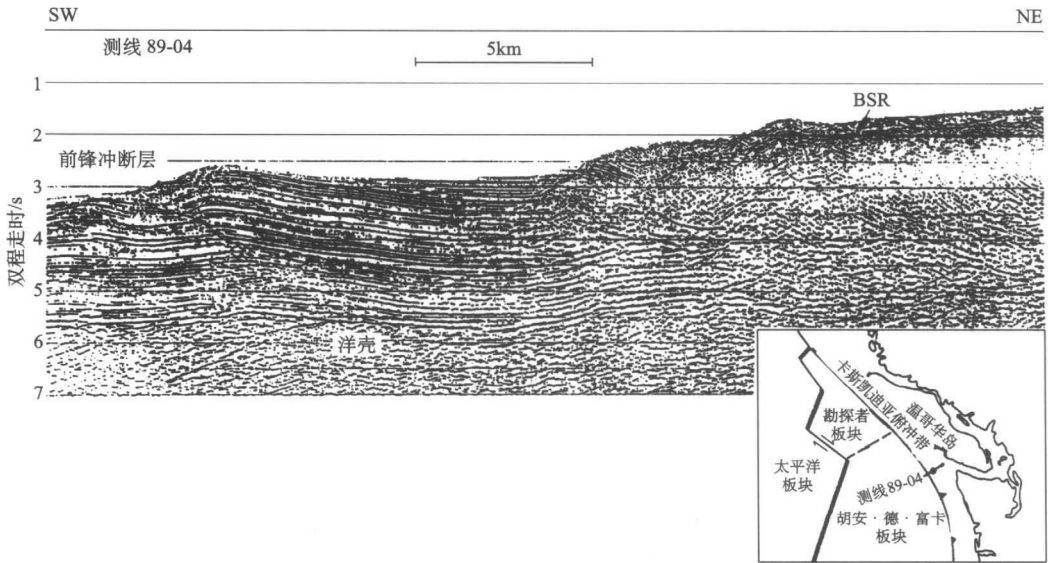


图 1.2 穿越温哥华岛外的北卡斯凯迪亚增生楔的多道地震剖面图
(Hyndman et al., 1992)

在过去的 4300 万年期间,沿温哥华岛近海靠陆一侧发育形成 60km 宽、20km 厚的巨型粗粒碎屑增生楔,楔体由变形前锋、逆冲断皱带及根带组成,其内发育斜坡盆地、褶皱、不整合和侵入体,反映为幕式汇聚及前弧火山活动的结果,变形前缘宽 10~20km。

卡斯凯迪亚盆地位于上述增生楔的斜坡部位,由浅部的早更新世细粒半远洋粉砂质黏土及上覆快速沉积的更新世黏土质粉砂夹细砂浊积物组成,厚 2~3km,埋藏浅、变形小,水深约 2500m;斜坡底部沉积物向上逆冲褶皱成狭长的背斜脊,脊宽 5km、高 750m,深部沉积物因压实和胶结作用,变形严重。变形前锋附近的逆冲断层垂直断距达 500m,逆冲断层使海底快速上升到 1400~1500m,形成海底阶地。BSR 主要位于水深大约 1300~600m 的中部斜坡,BSR 几乎出露至海底。

在俄勒冈增生楔复合体中,有一个长 25km、宽 15km,被水合物所覆盖呈帽状的水合物脊,由南北两峰组成(图 1.3),北峰最小水深 600m,南峰水深约 800m。

北峰:Kulm 等(1986)报道了利用人工和遥控两种功能的下潜式拖曳海底照相机首次揭示了北峰上的块状碳酸盐岩和生物群落活动景观。1988 年,在卡斯凯迪亚海沟东侧边缘朝海一侧的增生楔上放置了可视喷口取样器(VESP)系统(原型桶口取样器),第一次实现了俯冲带原位流体测量。1991 年,在水合物脊北峰(第二个增生楔)用同样方法记录并定量观测了流体流速。1992 年,为了定量分析该边缘流体及其化学性质,ODP 执行