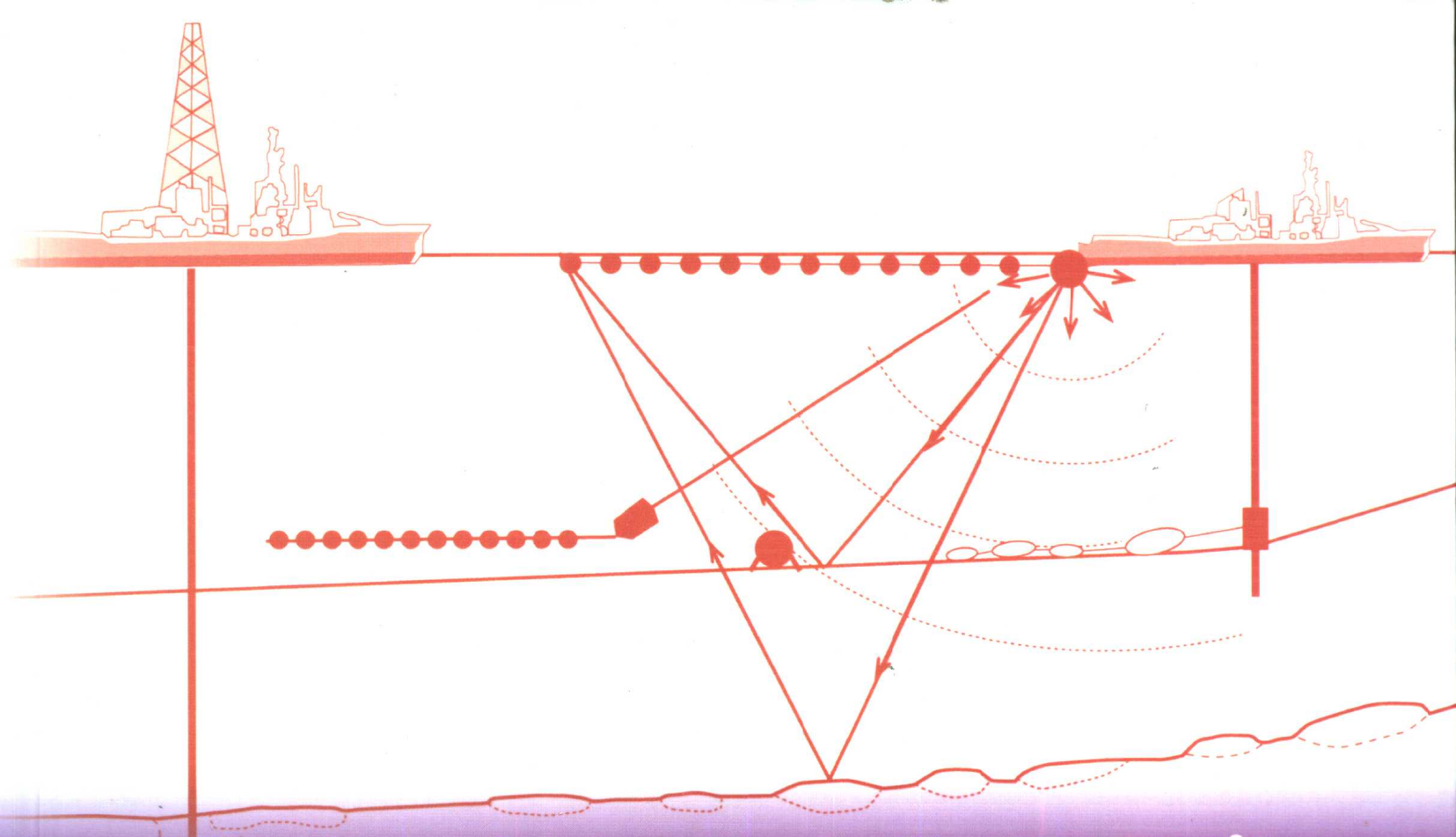




海域天然气水合物地震学

张光学 黄永样 陈邦彦 主编



海洋出版社

内容简介

本书是在国家自然科学基金“南海北部天然气水合物成藏条件研究”(49972047)和“八六三”计划的“海域天然气水合物地震探测技术初步研究”(820-探-5)课题研究期间部分学习与研究体会的基础上,以海域天然气水合物地震的方法、实践和认识等专题形式,将引导海域天然气水合物地震学科研究方向具有代表性的30余篇译文、论文整理集成册。内容主要涉及海域天然气水合物的地震采集方法、处理技术和综合解释效果等。

本书所涉及的内容大多是近几年海域天然气水合物地震发展的最新技术,所述地震研究内容全面、主题鲜明,引用的实例可信,对当前我国海域天然气水合物地震工作具有指导和借鉴作用,可广泛应用。

本书可供从事海洋地质及地球物理工作,特别是从事海域天然气水合物调查与研究的技术人员参考,也是一本地球物理相关专业的教师、研究生的有益的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海域天然气水合物地震学/张光学,黄永样,陈邦彦 主编. —北京:海洋出版社,2003.3

ISBN 7-5027-5828-3

I. 海… II. ①张…②黄…③陈… III. 海域—天然气—水合物—地震学 IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 010470 号

责任编辑:屠 强,文凤英
特约编辑:张光威,周立君,马建华,侯贵卿
(海洋地质杂志社)

海洋出版社 出版发行

Http://www.oceanpress.com.cn

(100081 北京海淀区大慧寺路8号)

青岛星球印刷有限公司印制

新华书店发行所经销

2003年3月第1版 2003年3月第1次印刷

开本:880×1230 1/16 印张:16.5

字数:500千字 印数:1~700册

定价:50.00元

海洋版图书印、装错误可随时退换

海域天然气水合物地震学

主 编:张光学 黄永样 陈邦彦

编写者:徐华宁 祝有海 姚伯初 杨胜雄 张 明 符 溪

吴必豪 何拥军 杨木壮 龚建明 文鹏飞 梁金强

蓝 利 沙志彬 王宏斌 邢 军

序

天然气水合物作为特定区域的新型烃类资源,是在一定温压条件下,由水与天然气结合形成的一种外观似冰的白色结晶固体,具有清洁、能量密度高、分布广、规模大、埋深浅、成藏物化条件好等特点。其储量之大可满足人类未来的需求,是不可多得的替代能源。

近 30 年随着对诸如岩石圈与流体地质作用、地幔柱深部对流等许多地学问题的关注,以及海洋资源调查、海洋环境观测及数字地震等一系列海洋高新技术的支撑,DSDP / ODP 组织先后多次在世界各大洋进行了多学科探查活动,海洋地学有了新的拓展空间,同时也获得了一份意外的收获——发现天然气水合物新能源。美国、加拿大、日本及印度等国高度重视这一新能源。自 20 世纪 90 年代初,由各国政府出资,地质调查局组织制定并实施中长期发展计划,至目前已初步圈定了邻近海域的天然气水合物分布范围,并广泛开展了调查技术、经济评价、环境效应等方面的研究。2002 年美国、加拿大和日本联合在 Mckenzie 三角洲 Mallik 2L-38 井中钻获天然气水合物,并进行了试验开采,成功地进行了钻前实验。

目前,用于海域天然气水合物探查的方法较多,主要有高分辨率多道反射地震、海底热流、深水多波束测深、海底摄像、地球化学异常探测和钻探等技术方法,其中反射地震是开展水合物调查研究的主要手段,从已发现的地区统计数字来看,用地震手段发现的占绝大多数。据初步统计,应用包括地震似海底反射层(BSR)、BSR 与取样、BSR 与测井、取样及其他(速度异常、化探异常、地貌)多种探测方法,在世界各海域可能发现的水合物矿点多达 85 处,其中由地震方法探测的有 68 处,足见该方法在海域水合物探测中的重要地位。由于地层中含天然气水合物,改变了沉积层原有的声学特征,存在明显的波阻抗差,才得以用地震方法开展天然气水合物调查与研究。

通常地震声波 P 波和 S 波对含水合物的沉积层反应甚为灵敏,利用这一特性,可采用多种地震反射方法来识别水合物的各种地震标志(如 BSR)。国外多年实践证明:该方法是应用最为广泛的快速有效方法,主要包括船载深水高分辨数字地震方法、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。地震探查方法包括地震采集、处理和解释等三大环节,采集技术是天然气水合物地震研究的首要关键技术,各环节是否为最佳组合将直接影响剖面质量及对天然气水合物的推断分析;处理方法也是地震探查天然气水合物的重要环节,处理应首先保证资料“高保真”常规处理,同时还应注意天然气水合物正、反演模拟等几项关键处理技术。

目前,已有多种地震探测技术在世界各海域中应用并发现了天然气水合物,如在地形变化较大的地区采用深拖多道地震组合探测(DTAGS)、广角地震(包括海底地震仪 OBS、

海底地震传感器、海底地震检波器 OBH、海底地震电缆 OBC) 用于深部构造研究的折反射地震等, 但用于水合物调查较多的地震技术是常规二维地震勘探(2D), 以及单道地震、浅层剖面等, 它们不仅可识别水合物 BSR, 而且可揭示与水合物形成密切相关的断裂和通道系统。近年来, 随着海洋资源勘查、海洋环境观测及数字地震等一系列海洋高新技术的发展, 越来越多地采用高分辨地震调查(HRS)手段。各海域调查区的水深、中浅层沉积厚度等水合物成矿条件不同, 以及调查研究的目的不同, 因而采用的地震调查方法有别, 因此, 应根据调查区的实际情况, 以“经济、快捷、方便、目的”为原则, 综合考虑采用最佳的地震调查手段。

地震探查技术日益显示其在海域水合物方面的重要作用, 也正是基于这种考虑, 作者编写了这本以海域天然气水合物地震探查所涉及的方法、实践和认识等专题文集, 其内容主要涉及到海域天然气水合物的地震采集、处理和综合解释等, 全面精辟地叙述了水合物地震所关注的“似海底反射(BSR)、波形反转、振幅空白带(BZ)、速度振幅异常结构(V' AMP)”四大地震响应特征, 讨论了波形反演、走时反演和非线性全波形走时反演及 AVO 方法对天然气水合物地震研究的应用效果; 通过优选活动大陆边缘和非活动大陆边缘地区天然气水合物矿藏的典型实例, 试图建立不同大地构造背景下天然气水合物矿藏与地震信息特征的有机联系; 最后结合我国近年海域水合物地震调查情况, 从区域成矿条件和局部成矿的地震特征角度, 初步总结了我国南海海域天然气水合物地震特征及资源前景。

《海域天然气水合物地震学》对海域天然气水合物地震调查与研究具有较高的参考价值, 是我国目前借鉴国外天然气水合物地震找矿经验的惟一的、较系统的且主题鲜明的海域天然气水合物地震研究文献, 相信它将有助于指导我国海域水合物地震调查工作。

希望作者通过不断实践, 进一步丰富海域天然气水合物地震学内容, 使水合物地震学理论逐渐成熟, 为水合物地震找矿提供更科学的信息。

中国工程院院士 李庆焕

2002 年 5 月 9 日

前 言

纵观水合物调查史,经分析研究发现天然气水合物广泛分布于世界海域的陆坡、陆隆或海台地区。活动陆缘俯冲带增生楔和非活动陆缘的陆隆海台断褶区是其富存的主要场所,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、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、亚马逊海底扇、阿根廷盆地、印度西部陆坡及尼日利亚滨外三角洲前缘等。在非活动陆缘,水合物的分布往往与断褶构造、底辟构造、海底扇及海底滑塌体等特殊构造密切相关。上述地区具备水合物形成及稳定存在所需的成矿地质条件,如适宜的沉积构造环境、合适的温压条件、充足的气源、有效的运移通道、高孔隙的储集空间和保存条件,这为今后调查提供了重要找矿线索。

我国的南海陆坡、陆隆区具有被动大陆边缘构造特征,分布有许多含油气沉积盆地,而冲绳海槽作为东海主动陆缘的一部分,发育成弧后盆地。晚中新世以来,这些盆地的区域沉降剧烈,沉积速率大,海洋有机物沉积十分丰富,具有天然气水合物形成所需的物源、温压及地质构造成矿条件。

从 1999 年到 2002 年,广州海洋地质调查局在海域天然气水合物地震调查方面做了大量的前期试验和研究工作,获得了大量的水合物地震证据,为寻找海域水合物发挥了重要作用。此前于 1998 年“海域天然气水合物地震探测技术初步研究”(820-探-5)课题得到“八六三”计划的支持,并在 2000 年同时也得到国家自然科学基金“南海北部天然气水合物成藏条件研究”(49972047)课题资助,希望为水合物的调查研究提供技术方法和理论支撑。现将研究期间的部分学习与研究体会——译文、论文以海域天然气水合物地震的方法、实践和认识等专题形式,集中整理发表,供有关技术人员参考,希望能起到抛砖引玉的作用,推动我国海域天然气水合物地震探查事业的发展。

本书包括海域天然气水合物地震采集方法、处理技术和综合解释效果等文章 30 余篇,共分概论篇、方法篇、实践篇和认识篇四大部分。

概论篇:引用 Keith A. Kvenvolden 和 E. Dendy Sloan 的经典论文,系统介绍了天然气水合物的定义、控制因素和分布位置等基本情况,以及水合物的形成机理、地球物理学和地球化学标志、甲烷资源量、地质灾害和全球气候变化,通过该介绍以期让读者对水合物有一基本了解。

方法篇:是关于海域天然气水合物的采集及特殊处理方法的有关内容,涉及到 BSR、速度和空白带等地震响应特征及其在水合物资源量估算方面的应用,特别是展现了围绕上述水合物地震响应特征所开展的走时反演、波形反演及全波形走时联合反演研究方法,

以及 AVO 方法在水合物地震特殊处理方面的应用效果,通过特殊处理可以更好地研究 BSR 波形、振幅及其附近的精细速度结构,达到水合物地震特征研究目的。

实践篇:侧重论述了不同大地构造背景下水合物地震响应特征。通过实例分析,介绍了活动大陆边缘(南极、秘鲁、卡斯凯迪亚、台湾、西里伯海、莫克兰)和非活动大陆边缘(日本千叶盆地、波弗特海、美国东南大陆边缘)水合物矿藏地震响应特征,为海域天然气水合物地震区域找矿提供线索。

认识篇:在国家自然科学基金、国家“八六三”探索课题研究的资助下,开展了世界海域天然气水合物地震特征研究,对不同大地构造背景下的天然气水合物成矿条件及地震特征有了初步认识。结合我国南海实例,对南海不同构造背景下(北部被动、西部剪切、东部俯冲、南部挤压)的天然气水合物区域成矿条件进行了分析,深入探讨了天然气水合物局部成矿地震特征,总结归纳了 4 种不同类型 BSR 的水合物地震响应特征。

水合物地震探查是一系统工程,包括采集、处理和解释等环节,每一项技术对最终结果都有较大影响。对于特定构造背景下,应采用何种地震调查手段以及采用的特殊处理方法和解释是否合理?这一系列诸多问题尚待深入探索。这里将海域天然气水合物的主要地震响应特征、不同构造背景下的天然气水合物地震探查研究方法及近几年南海天然气水合物地震认识的一些体会奉献给大家。毕竟这项工作在国内刚刚起步,尚不成熟。因此,作者真诚希望广大读者多提宝贵意见,共同推动海域天然气水合物地震技术的进步。

本书是为海域天然气水合物探查需要而编写,由张光学、黄永样、陈邦彦选编,并组织了编译和撰稿工作。其中,第一章天然气水合物基本知识由张光学、姚伯初编译;第二章天然气水合物 BSR 地震研究由张光学、何拥军、蓝利编译;第三章天然气水合物地震特征的正反演研究由张光学、徐华宁编译;第四章天然气水合物的 AVO 研究由张光学、徐华宁编译;第五章天然气水合物的速度振幅异常结构特征由邢军、徐华宁编译;第六章天然气水合物资源量的地震评价方法由符溪、徐华宁、王宏斌编译;第七章非活动大陆边缘天然气水合物地震学由张光学、张明、祝有海、吴必豪编译;第八章活动大陆边缘天然气水合物地震学由张光学、杨木壮、文鹏飞、梁金强、沙志彬编译;第九章海域天然气水合物地震特征及其勘测技术由张光学、陈邦彦、杨胜雄编写;第十章南海天然气水合物的地震特征及成矿远景由张光学、黄永样、祝有海、吴必豪编写;第十一章东海天然气水合物地震特征由龚建明编写。在课题研究和本书编撰期间,得到了金庆焕院士、姚伯初教授的指导,同时也得到关心此项事业的中国地质调查局、广州海洋地质调查局的各级领导重视以及许多同仁的帮助和支持,文凤英、张光威、周立君、马建华和侯贵卿等同志为本书的审校付出了辛勤劳动,在此一并表示衷心的感谢!

目 次

第 1 篇 概论篇

第1章 天然气水合物基本知识	(3)
1 天然气水合物的地质特征及全球变化	(3)
2 地球上的天然气水合物	(13)
3 结语	(23)

第 2 篇 方法篇

第2章 天然气水合物 BSR 地震特征	(27)
1 海洋甲烷水合物 BSR 的地震研究	(27)
2 海底流体排出及甲烷水合物 BSR 形成机理	(38)
3 令人迷惑的双 BSRs: 水合物稳定域变化的指示标志	(51)
4 结论	(56)
第3章 天然气水合物地震特征的正反演研究	(57)
1 宽角地震资料进行的全波形约束和走时反演	(57)
2 BSR 的速度结构: 全波形反演结果	(72)
3 近海大陆斜坡天然气水合物地震技术的约束反演	(76)
4 结论	(88)
第4章 天然气水合物的 AVO 研究	(90)
1 BSR 的 AVO 模拟	(90)
2 用地震 AVO 方法研究含气体水合物沉积物的内部结构	(98)
3 BSR 的地震速度和 AVO 效应	(104)
4 结论	(111)
第5章 天然气水合物的速度振幅异常结构特征	(114)
1 地震反射剖面上的速度和振幅结构	(114)
2 振幅空白与沉积物中气体水合物充填的相互关系	(126)
3 结论	(132)
第6章 天然气水合物资源量的地震评价方法	(134)
1 地震资料在估计深海沉积物原生天然气水合物含量中的应用	(134)
2 利用海洋地震数据估算气体水合物与游离气资源量	(144)
3 结论	(147)

第 3 篇 实践篇

第7章 非活动大陆边缘天然气水合物地震学	(151)
1 波弗特海大陆边缘之下与气体水合物相关的 BSR 地震研究	(151)
2 美国东南部大陆边缘气体水合物的地震特征	(160)
3 挪威斯瓦尔巴群岛西部的天然气水合物高分辨地震研究	(169)
4 西伯利亚贝加尔湖中含气体水合物沉积的多频地震研究	(173)
5 北极大陆边缘深浅水区气体水合物欠稳定的证据	(184)

6 结论	(187)
第8章 活动大陆边缘天然气水合物地震学	(190)
1 日本中部近海千叶沉积盆地桃子山嘴坳陷内的 BSR 成因及意义	(190)
2 台湾近海碰撞带内水合物 BSR 分布	(196)
3 卡斯凯迪亚大陆边缘区甲烷水合物稳定带地震层析研究	(200)
4 莫克兰增生棱柱体内 BSR 之下厚层游离气的证据	(204)
5 秘鲁近海气体水合物带底界的地震反射特征分析	(206)
6 南极南设得兰群岛岸外 BSR 地震层析研究	(216)
7 结论	(220)

第4篇 认识篇

第9章 海域天然气水合物地震特征及其勘测技术	(225)
1 世界海域水合物地震调查研究	(225)
2 海域天然气水合物地震学	(236)
3 海域天然气水合物综合勘测技术	(237)
第10章 南海天然气水合物的地震特征及成矿远景	(240)
1 南海天然气水合物的成矿条件	(240)
2 南海水合物的地震特征	(242)
3 南海水合物远景预测及结论	(246)
第11章 东海天然气水合物地震特征	(248)
1 东海天然气水合物的区域地质特征及可能的远景区	(248)
2 天然气水合物勘探中地震测线的布设	(250)
参考文献	(253)

第 1 篇 概论篇

第1章 天然气水合物基本知识

1 天然气水合物的地质特征及全球变化

1.1 基本知识

随着对天然气水合物兴趣的日益增长,人类就其在自然界中的意义产生了丰富的联想。例如,Leggett(1990)指出天然气水合物可以产生巨大的“温室”反馈作用,并影响未来全球气候。由于不稳定的天然气水合物能够释放大量的甲烷(一种“温室”气体),故导致这种正反馈形成。MacDonal(1990)强调天然气水合物作为甲烷和氢(可从水合物甲烷中提取)的一种潜在自然燃料资源的重要性。

正是这些物质引起众多环境专家的兴趣,并显示出对未来全球经济的重要性。

1.1.1 定义

天然气水合物,也称之为气体水合物、甲烷水合物或气体笼形物。在自然条件下呈固态,由水分子形成刚性的笼架晶格,每个笼架晶格中均包括一个气体分子(主要为甲烷)。因此,气体水合物实质上是一种水包气的笼形物,其中的水结晶成等轴晶系,而不是像冰那样呈六方晶系。在自然界,通常有Ⅰ型和Ⅱ型两种等轴(立方)晶格结构,其中Ⅰ型结构最为常见(图1-1)。在Ⅰ型结构中,笼架晶格以各自的笼架体心堆砌排列,笼架晶格之大足以包容甲烷、乙烷以及与之相似的其他气体分子(如二氧化碳、硫化氢等)。在Ⅱ型结构中,笼架晶格较大,不仅能包容甲烷和乙烷等气体分子,而且也能包容像丙烷、异丁烷这样大的气体分子(Sloan, 1990)。

甲烷在甲烷水合物中的最大赋存量取决于笼形物的几何形态。在一个完全饱和的Ⅰ型甲烷水合物中,每 $23/4$ 个水分子中就存在一个甲烷分子。从理论上讲,若适当考虑水合物膨胀系数,那么在标准温压状态下, 1 m^3 甲烷水合物可含有 164 m^3 的甲烷(图1-2)。因此,在地表下约1.5

km以浅的储层中,每单位体积气体水合物中可包容的甲烷量超过相同空间中可存在的游离气量(Hunt, 1979)。这一事实对气体水合物作为一种潜在的未来能量资源、海底地质灾害和全球气候变化因素等一些极有兴趣的问题作出了解释。本文将对气体水合物在这些潜在方面的问题进行论述。

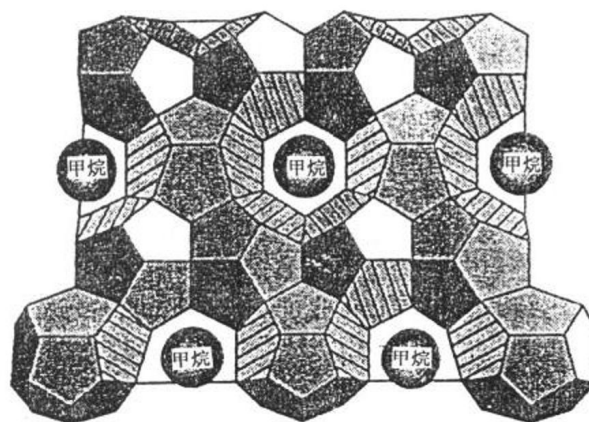


图 1-1 气体水合物结构(据 Hitchon 1974 修改)

在这种Ⅰ型结构的甲烷水合物中,刚性笼架由氢键联结起来的水分子构成,每一笼架(本图中画了剖开的两种类型)均包含一个甲烷分子。

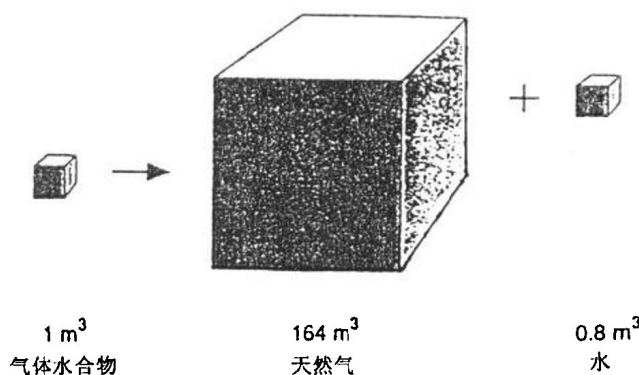


图 1-2 标准温-压条件下 1 m^3 气体水合物可产生 164 m^3 天然气和 0.8 m^3 水

1.1.2 控制因素

气体水合物在自然界的赋存受温度、压力和组分等条件相互作用的控制,相界图可予以说明(图1-3)。在甲烷水合物的温-压区,相界位置不仅取决于气体混合物(除了甲烷以外的其他气体)的

组合,而且还取决于水中的离子杂质。通常由于不知道沉积物孔隙中的气体和水的准确组分,因此,对处在稳定状态下天然存在的气体水合物通常是先假定纯甲烷和纯水组成一个体系,然后再估计它的深度和温度范围(Claypool 和 Kaplan, 1974)。

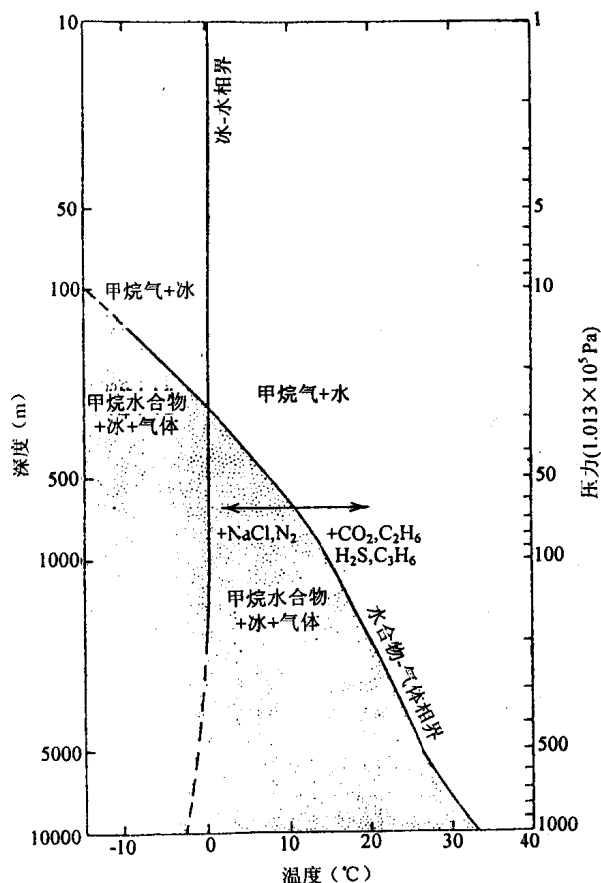


图 1-3 纯水—纯甲烷体系中的游离甲烷
(无图形)与甲烷水合物(本图图形)
的相界图(据 Katy 等修改)

水中含有 NaCl 时,相界向左漂移;甲烷中混有 CO_2 、 H_2S 、 C_6H_6 、 C_2H_6 气体时,相界向右漂移,水合物稳定域的面积相应增大。深度标尺:静水压力梯度为 10.1 kPa/m

相界资料(图 1-3)显示出:在地表温度低于 0°C 的两极大陆地区,存在甲烷水合物的深度上限约为 150 m;在大洋沉积物中,气体水合物出现在底层水温度接近 0°C 、水深超过 300 m 处。甲烷水合物赋存的深度下限取决于地温梯度,尽管此下限与局部条件不甚相关,但最大深度下限是在固体表面之下约 2 000 m。因此,气体水合物仅赋存于浅地圈中。从相界图(图 1-3)可知,气体水合物有一个不明显特征,即形成气体水合物需要大量的气体(甲烷)。气体水合物的形成,需要笼形物中有 90% 的晶格充满气体,即在标准温-压条件

下,每 1 体积的水应含有 150 体积的甲烷(Sloan, 1990)。但由于甲烷在海水中的溶解度很低,在标准温-压条件下,每 1 体积的水仅含有约 0.045 体积的甲烷(Yamamoto 等,1979)。因此,形成气体水合物所需的甲烷量远远超过了海水中的甲烷溶解量。在地球上有限区域内,可以预测并发现了形成大量甲烷的气体水合物。

1.1.3 分布位置

气体水合物在全球广泛分布,但由于需要满足温-压条件和气体体积两个条件,故它们仅分布于以下两类地区,即极地和深海。在两极地区,气体水合物通常在滨岸和大陆沉积物及近海的大陆架沉积物中与永冻层相伴生;在深海区,外大陆架边缘的斜坡和海隆沉积物(该地区出现寒冷的海底层水)中也发现有气体水合物。现已在阿拉斯加州西普拉德霍湾油田的陆上(Kvenvolden 和 McMenamin 等,1980))及 14 处深海区采集到气体水合物的样品,这为天然状态的气体水合物的存在提供了无可辩驳的证据(Kvenvolden 等,1993)。在 9 个地区(秘鲁近海、哥斯达黎加、危地马拉、墨西哥、美国东南部和西部、日本近海的两处、墨西哥湾)的深海钻探中,已经采集到了气体水合物。另外,在 6 个地区(黑海、里海、加利福尼亚北部近海、墨西哥湾北部、鄂霍次克海的两处)的浅层沉积物活塞样及重力样中,也均采集到了气体水合物。图 1-4 所示为在危地马拉近海采集到的气体水合物样品。

1.2 地质特征

1.2.1 地球物理学

对于其他大部分深海中赋存的气体水合物,主要是基于海洋地震反射剖面中明显的似海底反射层(Bottom Simulating Reflection, 简称 BSR)进行推测。该反射层的深度恰好与由相界图(图 1-3)所预测气体水合物稳定带底面的深度相一致(图 1-5)。BSR 的标志是高声速(上部的水合物一般胶结沉积)与低声速(下部的水合物未胶结沉积)之间的界面。气体水合物带底面的地震反射通常以反射极性发生反转为特征(与海底面反射相反的反射),且纵向反射系数较大,例如,美国东南部近海布莱克外海岭的 BSR 反射系数为 -0.12 ± 0.04 (Shiploy 等,1979)。这一负值反射系数表明,BSR 是一个位于上覆高速层与下伏低速层之间的反射界面。

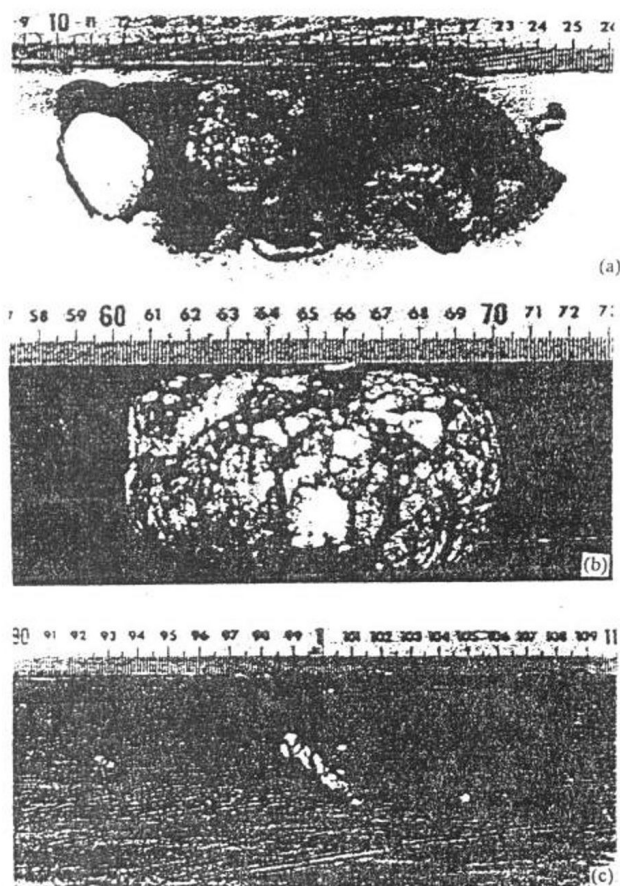


图 1-4 危地马拉近海 DSDP 第 84 航次采取的
气体水合物样品照片(据 Kvenvolden 和
McDonald, 1985, 修改)

图中(a)采自 568 号钻孔海底之下 404 m 处裂隙泥岩中的大块气体水合物;(b)采自 570 号钻孔海底之下 246 m 处泥岩裂隙中的气体水合物;(c)采自 570 号钻孔海底之下 246 m 处块状气体水合物(单位:cm)。

(1) 地温梯度

Sipley 等人(1979)和 Yamano 等人(1982)已采用将气体水合物 BSR 处的底层水的温度和深度资料与气体水合物的相界资料(图 1-3)相结合的办法来估算大洋沉积物中的地温梯度和热流值。这一方法已应用于布莱克外海岭、中美洲附近地区以及日本近海的 Nankai 海槽的地震资料分析中,估算得到的地温梯度值和热流值与用常规方法测定井底温度和地表热流所获得的结果相吻合。例如,将此方法用于秘鲁近海,由 BSR 估算出那里两个地区的地温梯度分别为 $43\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $49.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Kvenvolden 和 Kastner, 1990),这些结果与用直接测量法获得的结果(Yamano 和 Uyeda, 1990)相似。

(2) 定量评价

已用多道地震反射资料来分析气体水合物稳定带的若干特征。例如,Miller 等人(1991)进行 BSR 定量分析时,就采用了重处理地震记录和合成地震记录来估算秘鲁近海某地 BSR 处的气体水合物量和下伏的游离气带厚度。结果表明 BSR 在侧向上是不连续的。在 BSR 高振幅处,在气体水合物充填 10%孔隙的带下,游离气带的厚度为 5.5~17 m;在 BSR 低振幅处,游离气带的厚度远远小于 5.5 m,甚至缺失。在气体水合物 BSR 的地震研究中,Hyndman 和 Spence (1992)采用振幅偏移距(AVO)分析法和高分辨率速度分析法,研究了加拿大温哥华岛近海的 BSR,其结果与垂直入射资料模拟结果相似。结果表明该 BSR 之上为一厚 10~30m 的高速层,其中约 30%的孔隙中充填有气体水合物;在该 BSR 之下地震方法未能测到游离气。

(3) BSR 特征

在 BSR 下面是否存在游离气,是一个有争议而且至今尚未解决的问题。目前对气体水合物的形成及 BSR 的发育提出了两种模式。第一种模式假定甲烷是由气体水合物稳定带内的有机质经微生物作用生成(Claypool 和 Kaplan, 1974)。气体水合物的形成与沉积作用同期发生,随着甲烷水合物带的增厚和加深,该带最终沉降到气体水合物不稳定的温度区,在该区可能出现游离气,但若有合适的运移通道,游离气则能运移到上覆的气体水合物稳定带中(Kvenvolden 和 Barnard, 1983a)。该模式所得出的结论是,气体水合物应在整个气体水合物稳定带中出现,而游离气在 BSR 之下可能存在或不存在。第二种模式认为甲烷会伴随着上升的孔隙流体由下而上再次移动进入气体水合物稳定带(Hyndman 和 Davis, 1992)。该模式推测,甲烷大多是在稳定带以下的深部经微生物作用生成的,而不是在足以形成成因甲烷的深部所生成的。该模式的结论是,气体水合物应聚集在稳定带的底部(例如 BSR),而无法预测 BSR 之下存在的游离气。

这两个模式本来是可以验证的,因为在大洋钻探计划(ODP)第 141 航次(智利近海)和第 146 航次(温哥华岛近海),已计划对 BSR 反映的地震反射层取样,但在大洋钻探过程中,出于安全因素考虑,事先取消了对这些反射层的取心(Ocean Drilling Program, 1986)。遗憾的是,由第 141 航次所得到的结果意义不明确(Behrmann 等,

1992),而第 146 航次可用于此方面分析的资料尚不能利用。

(4) 电缆测井

除地震资料外,利用电缆测井等地球物理资料以及其他资料,也可勘探和评价气体水合物层段(Kvenvolden 和 Grantz,1990)。气体水合物的测井研究包括井径、伽玛射线、自然电位、电阻率、声波和中子孔隙度等测井方法(Goodman, 1980)。图 1-6 是位于阿拉斯加北坡的艾琳州西南地区 2 号井一个含气体水合物钻井层段的一组电缆测井特征曲线和一条泥浆气测井曲线图。对该

地区 445 口井的测井资料综合研究证实,电阻测井和声速测井特征曲线最为有用,并在其中的 50 口井中厘定出 6 个含气体水合物层段,并绘制成图(Collett 等,1988)。将艾琳州西北地区钻井的测井曲线与深海钻探计划(DSDP)在危地马拉近海的 570 号钻孔所获取的测井曲线进行对比,发现两者具有相似的特征,并可清楚地确定气体水合物带(Mathews,1986)。电缆测井资料为评估天然气数量提供了依据,与地震资料结合,将成为未来全球范围内气体水合物资源评价的关键。

1.2.2 地球化学

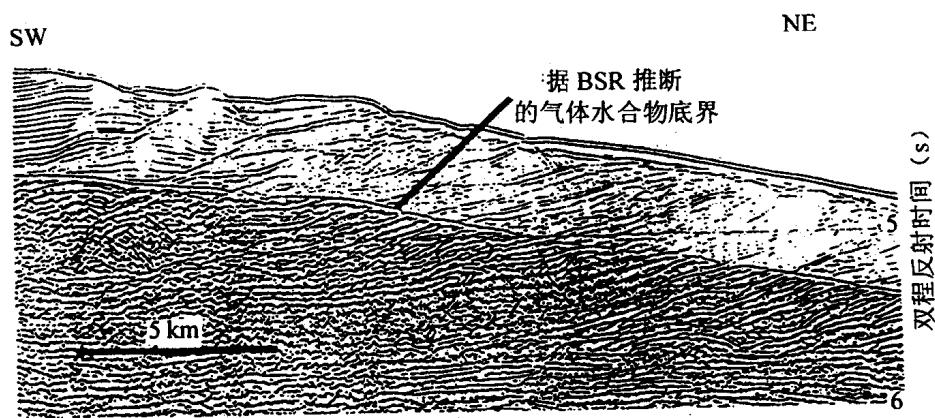


图 1-5 美国东南部近海布莱克外海岭脊及其东翼的 12 次覆盖多道反射剖面(据 Shipsey 等,1979,修改)
推测较强的 BSR 是气体水合物稳定带底面,位于 BSR 以上断开的交错地层极可能是气体水合物存在的显示,轮廓清晰且连续的 BSR 暗示出 BSR 处的气体水合物形成了圈闭游离气的封盖层。

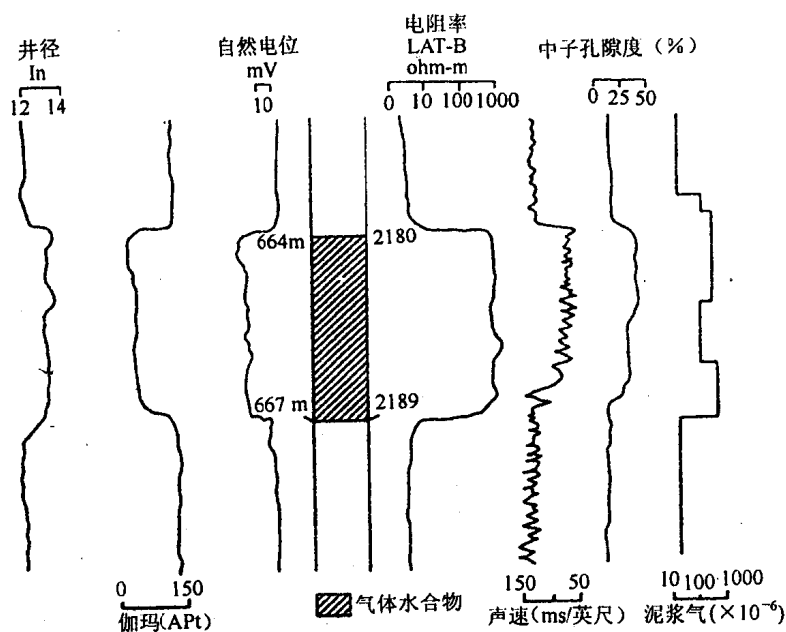


图 1-6 阿拉斯加北坡的西北艾琳 2 号井含气体水合物层段的电缆测井(井径、伽玛、自然电位(SP)、电阻率(LAT8)、声速和中子孔隙度)及总泥浆气测井的对比(据 Kvenvolden 和 Grantz,1990)

(1) 甲烷的来源

在前述的气体水合物形成的两种模式中,皆认为甲烷主要是有机微生物成因。得出这一结论主要是基于对已开采的气体水合物及已知气体水合物沉积段中烃类气体所进行的地球化学调查,这些样品分别来自美国东南部近海、加利福尼亚北部近海、秘鲁近海、黑海以及墨西哥湾的一些地点。这些调查结果表明,烃类气体分子组分和甲烷的同位素组分与预测的微生物生成天然气过程的结果相符。甲烷是烃类气混合物的主要成分,占99%以上,其同位素组分($\delta^{13}\text{C}$)与PDB标准(皮狄组美洲拟箭石标准)相比,通常要轻-6‰,其分子和同位素的分布范围具有微生物成因气的特征(Bernard等,1976)。

图 1-7 为布莱克外海岭的一个实例(Galimov

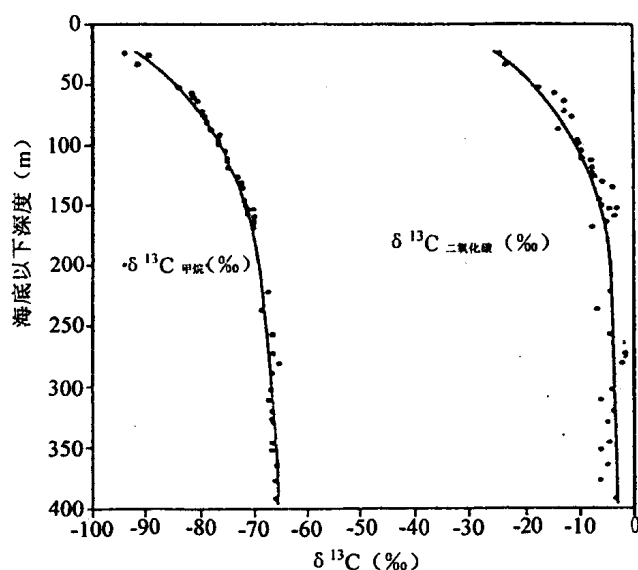


图 1-7 美国东南部近海布莱克外海岭 DSDP 第 76 航次 533 号钻孔的甲烷与二氧化碳的碳同位素组分随深度变化的分布(据 Galimov 和 Kvenvolden, 1983, 修改)

和 Kvenvolden, 1983), 其甲烷(产品)的碳同位素组分与二氧化碳(直接母体)的碳同位素组分之间存在着一致的曲线关系。从图中可以看出: 甲烷的同位素组分随着深度的增加而增大。由最浅部沉积物中的约 94 ‰ 上升至最深部沉积物中的约 -66 ‰, 说明它的 ^{12}C 值是与深度呈系统而非线性的变化。二氧化碳的碳同位素组分也随沉积物加深而增大, 从约 -25 ‰ 增至约 -4 ‰, 说明它的 ^{12}C 值减小趋势与甲烷碳同位素组分的趋势曲线基本平行。甲烷和二氧化碳在碳同位素值分布上相同且曲线相互平行的特征, 符合源于有机质的二氧

化碳经微生物还原而形成甲烷的概念。该结果证实了该地区气体水合物中的甲烷为微生物成因。在危地马拉近海 DSDP(Jeffrey 等, 1985)和秘鲁近海 ODP 等钻探中(Kvenvolden 和 Kastner, 1990), 均采集到了气体水合物, 其甲烷和(或)二氧化碳的同位素组分曲线也呈现相似的随深度而变化的趋势。

(2) 微生物成因甲烷与热成因甲烷的比较

对采自墨西哥湾气体水合物中甲烷的分析表明(Pflaum 等, 1986; Brooks, 等 1986), 甲烷在某些地点为微生物成因, 而在另一些地点却是热成因(表 1-1)。在花园滩和绿峡谷的水合物烃类气样品中, 甲烷含量达 99% 以上, 其碳同位素组分小于 -60 ‰, 其中绿峡谷和密西西比峡谷各有一个样品出现异常, 水合物烃类气中甲烷含量为 62%~78%, 甲烷的碳同位素组分为 -43.2 ‰~-56.5 ‰。在黑海, 与泥火山伴生的气体水合物含有烃类气, 其甲烷含量为 59%~96%, 碳同位素组分为 -44.8 ‰~-57.3 ‰。这些样品的分子和同位素组分域的特征表明甲烷属热成因(Bernard 等, 1976)。

在危地马拉近海 DSDP 第 84 航次发现气体水合物, 其气体分子组分和同位素组分表明, 所含甲烷既有微生物成因的, 也有热成因的(Kvenvolden 等, 1984)。采自最深部沉积物岩心样中的烃类气以及源于离解气体水合物获取的烃类气, 它们的甲烷含量小于 99%(Kvenvolden 和 McDonald, 1985), 说明甲烷属微生物成因。许多甲烷样品的碳同位素组分小于 -60 ‰(说明属微生物来源), 但有两个样品呈异常, 一个是深度在 210 m 以下的沉积物样, 其甲烷碳同位素组分值高达 -40 ‰; 另一个是块状气体水合物样, 其碳同位素组分为 -44 ‰(Jeffrey 等, 1985)。在实验室控制条件下, 对这一块状气体水合物样作详细的离解实验研究, 结果表明甲烷的碳同位素组分范围为 -36.1 ‰~-43.6 ‰(Kvenvolden 等, 1984)。通常认为, 碳同位素值大表明甲烷属热成因。然而, 还发现同位素值高的甲烷还伴有同位素值高的二氧化碳, 其气态二氧化碳的碳同位素组分为 +16.3 ‰(Jeffrey 等, 1985), 总溶解二氧化碳的碳同位素组分为 +37 ‰(Claypool 等, 1985)。

碳同位素值高的甲烷可能是由碳同位素值高的二氧化碳经微生物作用生成的, 其环境类似于

上文描述的布莱克外海岭环境。可能的解释是,其一,同位素值大的甲烷可能是在较深部位沉积的,由深埋有机质热演化生成后向上运移而成;其二,认为同位素值大的甲烷可能与同位素值大的二氧化碳同期共生,或是甲烷与二氧化碳之间发生了受某种未知同位素相互作用所控制而形成。甲烷属微生物成因这种解释较可靠,但也不能排除热成因这种说法。

以上论述说明水合物中甲烷的根本来源是深埋的有机质。在甲烷形成过程中,有机质不能经微生物作用产生中间性的产物——二氧化碳,深埋的有机质经历了自 80°C 至 150°C 的温度之后,发生热变质而直接产生甲烷 (Claypool 和 Kvenvolden, 1983)。有机质存在的数量和质量是甲烷生成过程中决定性的条件,由于形成气体水合物所需的甲烷量远远超过溶解于水中的甲烷量,因此形成气体水合物需要大量的有机质。对危地马拉近海含气体水合物沉积物中的现存有机质含量的观测结果表明,有机碳含量达 2.0%~3.5% 就足以在原地生成甲烷,且不发生运移。在布莱克外海岭,其含气体水合物中的现存有机质平均含约 1% 的有机碳。由此可见,气体水合物形成之时,在气体水合物稳定带中的有机碳含量无疑较高,大概是现存含量的两倍。

(3) 无机地球化学

在气体水合物形成的过程中,水分子结晶进入立方晶格结构,而且在形成正六方晶格冰的时候,将水合物晶体结构中的盐离子析出。对采自危地马拉近海含气体水合物中的水样品进行氯含量测定,表明样品中氯含量为 0.51‰~3.2‰ (Kvenvolden 和 McDonald, 1985),秘鲁近海的样品中为 1.8‰~8.2‰ (Kvenvolden 和 Kastner, 1990)。尽管这些样品均可能受到海水不同程度的污染,但样品中氯含量远远低于海水中 19.8‰ 的平均氯含量。在危地马拉近海 DSDP 第 67 航次的钻探过程中, Hesse 和 Harrison (1981) 首先注意到含气体水合物孔隙水样品中的氯含量随深度增大而减小,由大约 19‰ 降至 9‰。同时,孔隙水中的氧同位素组分 ($\delta^{18}\text{O}$) 相对于标准平均海水 (SMOW) 随深度增大至近于零值,到深度接近沉积物表面时,数值增至 +2.6‰。孔隙水中氧同位素组分的分离作用显然发生于气体水合物的形成期间,随着孔隙流体开采的深度变化在气体水合物发生分解之后,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 富集。在秘鲁近海

ODP 第 112 航次中,采集到气体水合物沉积物样品,观测它的孔隙水中氧同位素组分有相同的趋势 (Kvenvolden 和 Kastner, 1990)。

像在 DSDP 第 67 航次中所见的随着含气体水合物沉积物深度的增大氯含量呈下降的趋势,这种情况在布莱克外海岭 (DSDP 第 76 航次)、危地马拉近海 (DSDP 第 84 航次) 和秘鲁近海 (ODP 第 112 航次) 亦可见到。含氯量出现这种趋势,很大程度上是由于取心时气体水合物发生分解所致,是对原地孔隙水与已分解的气体水合物组成的混合物进行氯化物浓度测定,因此现已制造出一种先进的稀释器,用它可从深度不断增大的沉积物中挤出孔隙水。尽管不是一种惟一的信号,但孔隙水的演化是标志气体水合物是否存在的一种有用信号。淡水在大陆附近的沉积物中运移和粘土矿物的脱水作用,是引起孔隙水中氯含量下降的因素。然而,假如在含大量甲烷的沉积物中发现有孔隙水淡化现象,并且又位于气体水合物稳定带的深度范围内,则此处很可能是气体水合物的赋集区。

1.3 潜在的能量资源

有两个因素使得气体水合物极有可能成为潜在的能量资源。其一是在地表以下深约 2 000 m 的浅层沉积笼形物内,隐藏有大量的甲烷;其二是气体水合物在全球广泛分布。甲烷水合物的能量通量 (即在标准状况下每单位体积岩石中的甲烷体积) 是其他非常规气源 (如煤层、致密砂岩、黑色页岩和深部含水层) 能量通量的 10 倍,是常规天然气能量通量的 2~5 倍。

1.3.1 甲烷量的估计

对气体水合物中甲烷的估计大多是推测的,而且估计量变化非常之大 (Kvenvolden, 1988a)。尽管人们都知道气体水合物遍及全球,但对它们的赋存范围还不完全了解,因而导致对甲烷量的估计差别较大。美国天然气远景委员会 (Potential Gas Committee, 1981) 对过去的估计结果进行了归纳总结,甲烷的含碳量在北极永冻层区较低,为 $7.5 \times 10^{15} \text{ g}$,在大洋沉积物中较高,为 $4.1 \times 10^{21} \text{ g}$ 。当时对气体水合物中甲烷的含碳量的估算大致为 $10 \times 10^{18} \text{ g}$ 和 $11.4 \times 10^{18} \text{ g}$ 。在标准状态下,含碳量为 10^{10} g 的甲烷体积约等于覆盖整个地球表面 40 m 厚的甲烷层,地球上相对于气体水合物的有机碳储量如图 1-8 所示。如果这些评