

低碳能源技术
Low Carbon Energy Technology

天然气水合物 综论

肖 钢 白玉湖 董 锦 编著

**A Comprehensive Review
of Natural Gas Hydrates**



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

低碳能源技术
Low Carbon Energy Technology

天然气水合物 综论

肖 钢 白玉湖 董 锦 编著

**A Comprehensive Review
of Natural Gas Hydrates**

TIANRANQI SHUIHEWU ZONGLUN

内容简介

天然气水合物储量巨大、分布广泛、使用清洁，被认为是一种很重要的潜在替代能源。随着国际天然气水合物研究与实践工作的不断开展，新成果日新月异，因此，非常有必要对这些成果进行跟踪和总结，以便使科研人员把握研究方向，了解国际最新成果，缩短研发历程。本书主要介绍了天然气水合物的基本物理化学性质及其测量方法、地质成藏模式、勘探开发方法、在其他领域的应用和前景以及现场试验开采和商业开采可能导致的潜在的风险，使读者能够系统地了解天然气水合物这一领域。

本书内容丰富，论述浅显易懂，适合从事新能源研究和开发的科技工作者、教师及研究生阅读，也可供欲进入这一领域者参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气水合物综论 / 肖钢, 白玉湖, 董锦编著. — 北京: 高等教育出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 034009 - 9

I. ①天… II. ①肖… ②白… ③董… III. ①天然气水合物 - 研究 IV. ①P618. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 272629 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	刘占伟	封面设计	王凌波	版式设计	马敬茹
插图绘制	尹 莉	责任校对	俞声佳	责任印制	毛斯璐		

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400 - 810 - 0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京中科印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	11	版 次	2012 年 1 月第 1 版
字 数	190 千字	印 次	2012 年 1 月第 1 次印刷
购书热线	010 - 58581118	定 价	37.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34009 - 00

清洁能源对当今世界的重要性正得到人们的普遍认同。作为世界工业催化行业的领军企业，哈尔杜·托普索公司也认为我们的世界正面临一个清晰而紧迫的需求——能源的新型、清洁和高效的利用方式。

我已经 98 岁，比肖钢博士年长 48 岁，我们一直是难得的忘年交。大约 20 年前，年轻的肖钢博士在托普索公司开始他的职业生涯时，托普索家族就了解他并彼此成为好朋友了。从一开始结识，他的才干以及他对多学科知识的驾驭能力便给我留下了深刻的印象。我非常享受与他见面的时光，每次与他见面都是一个让我了解更多能源系统与大千世界的绝妙机会。时光飞逝，从我们结识以来，肖钢博士已经成长为一名世界级的领军科学家。他的科学技术知识面很宽，横跨无机化学、有机化学、电化学、物理化学和地球科学。他的热情、包括做事时巨大的激情以及他独特的人格魅力给人以深刻的印象。

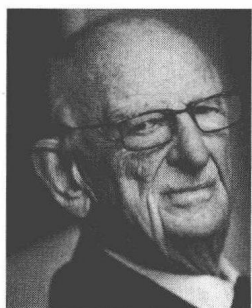
上次见到他的时候，他向我介绍了他正在为中国读者编写的一套清洁能源方面的科技丛书。我非常高兴为这套丛书作序，并借此机会向所有对清洁能源的发展感兴趣的同仁推荐肖钢博士的作品。

哈尔杜·托普索



董事局主席、公司创始人

哈尔杜·托普索 先生简介



Haldor Frederik Axel Topsoe (哈尔杜·托普索), 1936年毕业于丹麦技术大学 (DTU), 1940年创立哈尔杜·托普索公司。公司成立70多年来, 一直秉持着只有通过应用基础研究才能建立和保持独一无二的催化市场地位的经营理念, 现在是世界工业催化领域家喻户晓的领军企业。由于成绩斐然、对社会的贡献巨大, 哈尔杜·托普索先生曾被授予诸多国际荣誉, 包括丹麦皇室授予的皇家大爵士勋章。

It is widely recognized that clean energy is an area of increasing importance to our world. As one of the leading companies in the catalysis industry, Haldor Topsoe fully shares the view that this world has a clear and compelling need to use our energy resources in new, clean and efficient ways.

I am now 98 years old. With an age difference of 48 years, I have enjoyed a friendship with Dr. Gang Xiao between generations. The Topsoe family has known Dr. Gang Xiao for almost 20 years, since he as a young man began his career with the company many years ago. Right from the beginning I was impressed by his talents and multidiscipline approach and I have always enjoyed his presence, and every time we are together I use the opportunity to learn more about energy systems and the wider world. Since our early encounters Dr. Xiao has developed into a world leading scientist with active knowledge across a broad spectrum of science and technology, including inorganic and organic chemistry, electrochemistry, physical chemistry, and geosciences. His enthusiasm, tremendous passion, and his unique appealing personality have always impressed me very much.

The last time I met him, Gang told me that he had finished writing a series of books on clean energy technologies to the Chinese readers. I am delighted to recommend Dr. Gang Xiao's books to all those interested in the progress and possibilities in the field of clean energy.

Haldor Topsoe



Chairman and Founder

油气作为一种重要的战略资源，在国民经济、社会发展及国家能源战略安全方面所起的作用是毋庸置疑的。伴随着国民经济的高速发展，油气资源短缺已经成为制约经济发展的一个重要瓶颈。近年来，国际上在页岩气、天然气水合物等非常规气资源勘探与开发方面取得了长足的进展。美国在页岩气勘探开发领域取得了至关重要的突破，成功地实现了页岩气的商业性开采。以加拿大、日本等国为首进行的天然气水合物勘探和开发实验也取得历史性突破，在高寒冻土区域进行了试验性生产。日本有望在近几年实现海域天然气水合物的试验开采。这越来越表明，非常规气资源有望很好地缓解油气资源紧张的局面。

我国有着丰富的非常规气资源，据初步估算，我国页岩气资源量和美国相当，具有很好的勘探开发前景。我国在南海海域、青藏高原永久冻土带成功地钻探到天然气水合物样品，初步证实了我国具有丰富的天然气水合物资源。近些年，我国已经进行了非常规气资源的勘探和开发，并取得了很好的进展。但整体而言，我国在该领域尚处于起步阶段，与国际先进水平相比仍有很大的差距，仍需广大科研人员坚持不懈地努力。为尽早实现非常规气资源的商业性开发，我国政府已持续加大投入力度。恰逢此时，我很高兴地看到肖钢博士及其合作者正在编写关于天然气水合物和页岩气勘探开发研究进展方面的书籍，他们系统地介绍了非常规气资源的勘探开发技术的最新进展，这对科研人员掌握国际发展现状大有裨益。

肖钢博士是国家和中海油引进的海外高级人才，在清洁能源领域成果丰硕，已经出版了数本学术专著，希望其在非常规气领域的书籍也会被读者关注和喜欢。

曾恒一

中国工程院院士

作者简介

肖钢

1984年毕业于东北大学热能工程系。1992年获得丹麦技术大学化学系博士学位。著有《燃料电池技术》、《黑色的金子——煤炭开发、利用与前景》、《新能源经济引领新经济时代》、《低碳经济与氢能开发》、《大规模化学储能技术》、《分布式能源综论》、《还碳于地球——碳捕获与封存》、《观澜集》等。

目前供职于大型国有能源企业，是英国皇家化学会院士（FRSC）、国际节能环保协会（IEEPA）专家、中国可再生能源学会氢能专业委员会理事、清洁煤技术全国理事会常务副理事长，中国《煤炭转化》杂志理事会常务理事代表、中国二甲醚协会常务理事、北京市重点产业知识产权联盟特聘专家、美国 Case Western Reserve University 客座教授、西北大学客座教授、同济大学客座教授、中科院大连化学物理研究所客座研究员。

作为主要发明人，享有国际及中国授权和受理的专利 180 余项。

白玉湖

1976 年出生于辽宁鞍山，满族，高级工程师。2002 年毕业于中国石油大学（华东）石油工程专业，获得油气井专业硕士学位。2006 年获得中国科学院力学研究所流体力学博士学位。2008 年由中国石油大学（北京）博士后流动站、中国海洋石油研究中心博士后科研工作站出站。主要从事天然气水合物和提高油气采收率等方面的科研工作。参编《石油天然气工业水下生产系统的设计与操作》、《海洋石油工程设计指南》第 12 册，在国内外期刊及重要会议发表论文 50 余篇，作为主要发明人授权和受理专利 8 项。

董锦

2008 年毕业于中国石油大学（华东）化学工程与工艺专业，获工学学士学位，并辅修工程管理专业，获管理学学士学位。2011 年获中国石油大学（北京）化学工程专业工学硕士学位。曾在中国石油大学水合物研究中心、新能源研究中心做科研工作，主要从事气体水合物技术、分离工程、流体相平衡与物性等方面的研究，在国内外期刊上发表论文多篇。

前 言

天然气水合物是烃类气体分子与水在低温高压条件下形成的，因其外表似冰，可以燃烧，俗称可燃冰。据天然气水合物的形成条件分析，地球上的天然气水合物蕴藏量十分丰富，大约 27% 的陆地（大部分分布在永冻区）和 90% 的海域都含有天然气水合物。保守估计，天然气水合物中有机碳含量是煤、石油、天然气等化石能源中总有机碳含量的两倍，因此被看做是一种未来的替代能源。 1 m^3 的天然气水合物能够分解产生 164 m^3 （标准状态下）天然气。天然气水合物储量巨大、分布广泛、燃烧清洁，被认为是一种很重要的潜在替代能源。美国、日本等国已经把天然气水合物开发提升至国家能源战略层次，并制定了相应的开发计划，预计在 2015 年或 2016 年实现天然气水合物的商业开采。尽管目前看来天然气水合物的商业开采时间尚有很多不确定性，但美国和日本对天然气水合物的重视程度却可见一斑。印度、韩国也在国家层面上积极推动天然气水合物的研发。目前国际上已形成天然气水合物的研究热潮。

虽然我国自 20 世纪 90 年代才开始进行天然气水合物的研究工作，但已经取得了长足的进展。2007 年在南海神狐海域成功地钻探到了天然气水合物样品，使我国成为继美国、日本、印度之后第 4 个通过国家级研发计划采集到天然气水合物实物样品的国家，南海的神狐海域则成为世界上第 24 个采集到天然气水合物实物样品的地区，也是第 22 个在海底采集到天然气水合物实物样品的地区和第 12 个通过钻探工程采集到天然气水合物实物样品的地区。2009 年 9 月，我国在祁连山南缘永久冻土带成功地钻获了天然气水合物实物样品，这是我国继 2007 年 5 月在南海北部钻获天然气水合物之后的又一重大突破，也是继加拿大 1992 年在马更些三角洲、美国 2007 年在阿拉斯加北坡通过国家计划钻探发现天然气水合物之后，在陆域通过钻探获得天然气水合物样品的第 3 个国家。虽然如此，我国在天然气水合物研发方面与国外尚有一定的差距。随着国际天然气水合物研究工作的不断开展，新成果日新月异，因此非常有必要对国际天然气水合物研究进展进行跟踪和总结，以缩短我国天然气水合物的研究进程，减小与国际先进水平之间的差距。

本书分为7章。第1章系统地综述了天然气水合物的研究进展,美国、日本等国的天然气水合物开发计划以及我国的研究现状。第2章概括了天然气水合物的物理化学性质以及相关的物理化学性质的测试技术。第3章对国内外关于天然气水合物成藏模式的最新研究成果进行了归纳。第4章阐述了天然气水合物勘探开发技术,对天然气水合物地球物理标志、地球化学标志、生物学标志、海底地貌标志、天然气水合物取心技术以及天然气水合物开采方法等最新进展进行了总结。第5章探讨了天然气水合物的其他相关应用技术,包括天然气水合物的储存、运输以及在其他领域的应用前景。第6章研究了天然气水合物开发时的潜在风险,包括对海洋地质、气候、生态环境的影响,并重点阐述了海域天然气水合物开发对海洋石油钻采的潜在风险。第7章分析了陆地天然气水合物试验开采的进展。

限于时间和作者的能力,书中难免有不当之处,请读者批评指正。

肖钢

2011年6月18日

目 录

第 1 章 天然气水合物研究现状	1
1.1 天然气水合物分布及储量	1
1.2 我国的天然气水合物资源	6
1.2.1 我国海域的天然气水合物资源	6
1.2.2 我国冻土带的天然气水合物资源	7
1.3 国际上天然气水合物研究进展	8
1.3.1 20 世纪 70 年代以前研究进展	11
1.3.2 20 世纪 80 年代研究进展	12
1.3.3 20 世纪 90 年代研究进展	13
1.4 世界主要国家天然气水合物研究计划	14
1.4.1 美国天然气水合物研究计划	14
1.4.2 日本天然气水合物研究计划	18
1.4.3 韩国天然气水合物研究计划	20
1.5 我国天然气水合物研究现状	21
第 2 章 天然气水合物的概念及性质	25
2.1 天然气水合物的概念	25
2.2 天然气水合物的结构形态	26
2.3 天然气水合物的性质	28
2.3.1 天然气水合物的热力学性质	28
2.3.2 天然气水合物的动力学性质	33
2.4 天然气水合物的相平衡研究	37
2.4.1 天然气水合物相平衡的实验研究	37
2.4.2 天然气水合物相平衡的判定标准	38
2.4.3 天然气水合物相平衡的测定方法	39
2.5 天然气水合物物性的测试技术	40
2.5.1 天然气水合物样品的处理与保存	41

2.5.2 天然气水合物含气量的测定	41
2.5.3 天然气水合物的典型分析方法	42
第3章 天然气水合物成藏及特征	47
3.1 天然气水合物成藏模式	47
3.2 海洋天然气水合物的类型和特征	55
3.3 与常规油气藏伴生的水合物矿藏	57
3.4 天然气水合物矿藏产状和特征	58
3.4.1 天然气水合物矿藏产状	58
3.4.2 天然气水合物矿藏特征	59
第4章 天然气水合物勘探和开发技术	61
4.1 天然气水合物的地球物理标志	61
4.1.1 常规地震剖面上的拟海底反射	61
4.1.2 常规地震剖面上的速度-振幅异常结构现象	62
4.1.3 振幅随偏移距变化属性剖面上的识别标志	63
4.1.4 波阻抗反演剖面上的识别标志	64
4.1.5 天然气水合物测井识别标志	64
4.2 天然气水合物地球化学标志	66
4.2.1 气体异常法	66
4.2.2 离子浓度异常法	67
4.2.3 稳定同位素法	68
4.3 天然气水合物生物学标志	69
4.4 天然气水合物海底地形地貌标志	71
4.5 天然气水合物取心技术	72
4.5.1 保温保压取样装置	73
4.5.2 非保温保压取样装置	80
4.6 天然气水合物开采方式	83
4.6.1 降压法	83
4.6.2 注热法	86
4.6.3 注化学试剂法	88
4.6.4 天然气水合物开采的新方法	89
4.6.5 其他开采方法	91
第5章 天然气水合物相关技术应用	95
5.1 天然气水合物的储存与运输	95

5.1.1 天然气的储存和运输	95
5.1.2 天然气水合物储运的特点	98
5.1.3 天然气水合物储运的技术路线	100
5.1.4 天然气水合物储运的关键技术	104
5.1.5 天然气水合物储运技术的前景	106
5.2 天然气水合物储运技术的应用前景	107
5.2.1 调节天然气使用中的不均衡性	107
5.2.2 用作车用燃料	108
5.2.3 近临界和超临界萃取	108
5.2.4 在生物工程和新材料领域的应用	109
5.2.5 水合物的三相混输	109
5.2.6 生物酶活性控制及提取	110
5.2.7 海水脱盐淡化	110
5.2.8 气体混合物分离	111
5.2.9 处理有毒、有害物质	112
5.2.10 输送煤层气	112
5.2.11 其他应用	113
第6章 天然气水合物开发的潜在风险	115
6.1 天然气水合物与地质灾害	115
6.2 天然气水合物与温室效应	117
6.3 天然气水合物与生态环境	119
6.4 天然气水合物开发对海洋石油钻采的潜在风险	122
第7章 天然气水合物试开采进展	129
7.1 Messoyakha 地区天然气水合物开采状况	129
7.2 Mallik 地区天然气水合物开发试验	133
7.2.1 Mallik 地区天然气水合物概况	133
7.2.2 Mallik 2002 项目试验开采	135
7.2.3 Mallik 2006—2008 项目试验开采	142
参考文献	145

天然气水合物研究现状

1.1 天然气水合物分布及储量

天然气水合物（因可以燃烧，俗称可燃冰）是在一定条件下由轻烃、二氧化碳及硫化氢等小分子气体与水相互作用形成的白色固态结晶物质，是一种非化学计量型晶体化合物，或称笼形水合物、气体水合物。自然界中存在的天然气水合物（natural gas hydrate，简称 NGH）的主要成分为甲烷（>90%），所以又常称为甲烷水合物，纯天然气水合物，如图 1.1 所示。

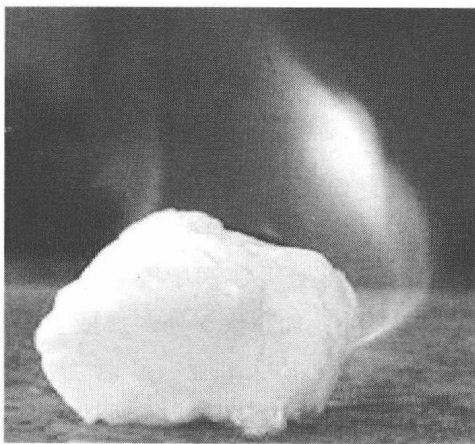


图 1.1 正在燃烧的天然气水合物

地球上天然气水合物的蕴藏量十分丰富，大约 27% 的陆地（大部分分布在冻结岩层）上和 90% 的海域中都含有天然气水合物。最有可能形成天然气水合物的两个区域是：

（1）高纬度陆地（冻土带）和大陆架。陆地上的天然气水合物存在于 200 ~ 2 000 m 深处，主要分布于高纬度极地永久冻土带之下，或者大陆边缘的斜坡和隆起处，这里的温度很低。全球极地永久冻土带地区的面积约为 $1.1 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，其

中我国青藏高原永久冻土带的面积为 $1.588 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

(2) 海底。一般认为,当海水深度超过 500 m 时,海底沉积物所处的温度、压力就能够满足天然气水合物的形成条件。海域的天然气水合物主要赋存于陆坡、岛坡和盆地的上表层沉积物或沉积岩中。

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赋存的主要场所。从全球范围来看,已发现多处水合物的分布带,大致沿麦索雅哈河—普拉德霍湾—马更些三角洲—青藏高原和北冰洋—大西洋—太平洋—印度洋形成两个水合物分布带。在环西太平洋地区,俄罗斯—朝鲜—日本有较多发现,澳大利亚—新西兰也有发现(吴能友等,2008)。

天然气水合物的主要分布区域如下:

(1) 西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、日本四国海槽、日本南海海槽、印尼苏拉威西海、澳大利亚西北海域及新西兰北岛外海。

(2) 东太平洋海域的中美海槽、北加利福尼亚—俄勒冈滨外、秘鲁海槽。

(3) 大西洋海域的美国东海岸外布莱克海脊、墨西哥湾、加勒比海、南美东海岸外陆缘、非洲西海岸海域。

(4) 印度洋的阿曼海湾。

(5) 深水湖泊,如内陆的里海和黑海。

(6) 极地地区,如北极的巴伦支海和波弗特海,南极的罗斯海和威德尔海。

(7) 大陆永久冻土带地区,如俄罗斯的西伯利亚,中国的青藏高原等。

据最新资料显示,迄今已在全球至少 116 个地区发现了天然气水合物,其中陆地 38 处(永久冻土带)、海洋 78 处。海洋中天然气水合物的分布情况如下:美国 12 处,日本 12 处,俄罗斯 8 处,加拿大 5 处,挪威、中国、墨西哥各 3 处,秘鲁、智利、巴拿马、阿根廷、印度、澳大利亚、新西兰、哥伦比亚各 2 处,巴西、巴巴多斯、尼加拉瓜、危地马拉、委内瑞拉、哥斯达黎加、乌克兰、巴基斯坦、阿曼、南非、韩国各 1 处,南极永冻带 5 处。这些发现大多数是通过地球物理资料的解释而确定的[如获得地震拟海底反射(BSR)标志],并由国际大洋钻探(ODP)和国际深海钻探(DSDP)的实际钻探成果予以证实。其中有 15 处通过钻井取样确认;8 处通过钻井测井发现;8 处由活塞取心和重力取心器发现。

从 Makogon 指出在苏联境内的永久冻土中存在天然气水合物开始,关于天然气水合物的储量问题就一直存在着两种截然不同的观点。其中一种观点认为:考虑到天然气水合物的分散性和开采难度,可忽略水合物的存在。另一种观点则认为:在地球上的永久冻土(占陆地面积的 27%)以及海洋的热力稳定区域(占海

洋面积的 90%) 中, 水合物普遍存在而且不可忽略。30 多年来, 各国学者对全球天然气水合物资源量的研究总体上可分为三个阶段: 20 世纪 70 年代至 80 年代早期 ($10^{17} \sim 10^{18} \text{ m}^3$ 量级)、20 世纪 80 年代晚期至 90 年代早期 (10^{16} m^3 量级)、20 世纪 90 年代晚期至今 ($10^{14} \sim 10^{15} \text{ m}^3$ 量级)。分析发现, 最早的估算结果比现今的偏大 2~3 个数量级。天然气水合物资源估算量随时间的变化关系如图 1.2 所示。

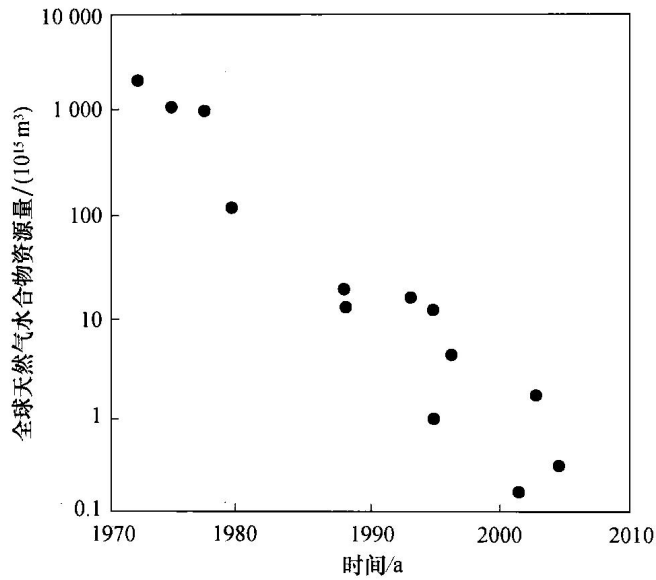


图 1.2 20 世纪 70 年代至今不同时期对天然气水合物资源量的估算 (葛倩等, 2005)

尽管对于全球天然气水合物资源量的估算值差别很大, 目前各国科学家还是较为一致地认为其资源总量为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。如果将此储量折算为地球上的有机碳资源, 它将占全球总有机碳量的一半以上, 约为所有化石能源 (煤、石油和天然气) 中含碳量总和的两倍。因此, 作为未来的潜在能源, 天然气水合物无疑具有极大的吸引力。但实际上, 关于全球的天然气水合物的储量仍旧是一个争议不断的问题。各国学者的结论之所以差别较大, 主要是因为很难有一个公认的计算方法来确定天然气水合物的资源总量。表 1.1 给出了几十年来人们对海洋和冻土中天然气水合物资源量的估计值。其中最大值是 Dobryn 等提供的, 他假设不管是否满足热力学条件, 水合物都存在; 最小值则来自 Mclver 和 Meyer, 他们考虑了更多的限制因素, 例如甲烷的可用性、有限的多孔度、有机物质所占的百分比以及不同地区的热力学条件等。人们对天然气水合物的估值都是带有推测性的。但近年来通过不同的方法, 由不同的人所得的估值都反映出以水化合物形式存在的天然气的储量很大。

表 1.1 天然气水合物在自然界中储藏量的估计值

永久冻土水合物/ m^3	海洋水合物/ m^3	参 考 文 献
5.7×10^{13}	$(5 \sim 25) \times 10^{15}$	Trofimuk 等 (1977)
3.1×10^{13}	3.1×10^{15}	Melver (1982)
3.4×10^{16}	7.6×10^{18}	Dobrynin 等 (1981)
1.4×10^{13}		Meyer (1981)
1.0×10^{14}	1.0×10^{16}	Makogon (1981)
	1.8×10^{16}	Kvenvolden (1988)
7.4×10^{14}	2.1×10^{16}	MacDonald (1990)
	$(2.6 \sim 13.9) \times 10^{16}$	Gornitz 和 Fung (1994)
	0.38×10^{15}	Ginsburg 和 Soloviev (1995)
	$(0.38 \sim 1.0) \times 10^{15}$	Soloviev (2002)

从表 1.1 可以看出：大多数研究者都认为海洋中天然气水合物的储量比永久冻土中的储量至少高两个数量级。对海洋中水合物资源的估值是如此之大，以至于其储量估值的误差几乎等于永久冻土中水合物的储量估值。

表 1.2 给出了全球天然气水合物资源量估算过程中不同学者所采用的主要参数，正是因为参数取值不同导致了资源量的估值相差较大。Kvenvolden 指出，水合物中的甲烷比可回收的常规甲烷多 100 多倍。Ginsburg 和 Soloiev 指出，水合物的储量可能低于一般认为的储量，并认为以前的估计值夸大了沉积物的含量，夸大了水合物连续区域分布的概念。然而即使是保守估计，水合物中天然气的含量仍然有 10^{15} m^3 ，即认为水合物中气体的含量是常规能源的 10 倍是合理的。从表 1.2 可看出，水合物中蕴含的天然气资源有着巨大的能源潜力。

天然气水合物中天然气量的大小主要取决于以下 5 个参数：①天然气水合物的分布面积；②储层厚度；③孔隙度；④水合指数；⑤天然气水合物饱和度。因此天然气水合物层中天然气的体积的表达式可由下式表示：

天然气水合物层段内天然气的体积 = 天然气水合物的分布面积 (m^2) $\times$ 天然气水合物层的厚度 (m) $\times$ 天然气水合物储层孔隙度 (%) $\times$ 天然气水合物饱和度 (%) $\times$ 天然气水合物产气因子 (水合指数为 6.325 时产气因子为 164，水合指数为 7.474 时产气因子为 139)。

目前，国际上计算天然气水合物中天然气体积的权威方法是“容积法”，并取全球海域含天然气水合物矿层面积为 $(5 \sim 6) \times 10^7 \text{ km}^2$ 、矿层沉积水合物厚度为 500 m、沉积物孔隙度为 50%、充填率为 10%。经此方法计算得到的水合物中所含天然气约为 $(1.8 \sim 2.1) \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。