

非常规能源之天然气水合物系列

天然气水合物

的

地球物理特征与测井评价

李 新 肖立志 编著



NATURAL GAS HYDRATES
GEOPHYSICAL
CHARACTERISTICS AND
WELL LOGGING EVALUATION

GAS HYDRATES

天然气水合物是分布于深海沉积物或陆域的永久冻土中,由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰的、非化学计量的笼形结晶化合物。因其外观像冰一样而且遇火可燃烧,所以又被称作可燃冰、固体瓦斯或气冰。

工业出版社

非常规能源之天然气水合物系列

天然气水合物的地球物理特征 与测井评价

李 新 肖立志 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书通过对天然气水合物地球物理特征和实际测井资料的深入分析,详细考察了天然气水合物储层在常规测井、电成像测井和核磁共振测井上的响应特征,对天然气水合物的定性识别和定量评价方法进行了系统研究,内容翔实,图文并茂,具有很高的学术价值和参考价值。

本书可供石油测井工作的广大技术人员及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

天然气水合物的地球物理特征与测井评价 / 李新, 肖立志编著.
北京: 石油工业出版社, 2013.10
(非常规能源之天然气水合物系列)
ISBN 978-7-5021-9499-4

I. 天…

II. ①李…②肖…

III. ①天然气水合物—地球物理学

②天然气水合物—测井—评价

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 036163 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.pip.cnpc.com.cn

编辑部: (010) 64523736 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 9

字数: 143 千字

定价: 50.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

海底沉积物和大陆永久冻土带中蕴藏着大量以甲烷为主要成分的天然气水合物，是一种极具潜力的优质能源。天然气水合物储量可以通过构造面积、储层厚度、孔隙度和饱和度等参数来定量评价。地球物理测井方法具有直接、连续和经济地测量地层原位状态下天然气水合物储层性质的优势，对定性识别天然气水合物储层和定量计算储层孔隙度及天然气水合物饱和度等参数具有重要作用。

本书通过对天然气水合物储层的地球物理特征和实际测井资料的分析，考察了天然气水合物储层在常规测井、电成像测井和核磁共振测井上的响应特征，对天然气水合物的定性识别和定量评价方法进行了系统研究。天然气水合物储层在常规测井、电成像测井和核磁共振孔隙度测井上特征明显，可以得到较好的识别。多个实例分析验证了常规油气藏评价方法在天然气水合物储层评价中有一定的适用性，但需要建立新的响应方程和评价流程。本书从岩石物理体积模型出发，给出了不同地质条件下天然气水合物储层的多组分体积模型和相应的孔隙度及饱和度响应方程与评价流程。

需要特别指出的是，天然气水合物储层测井在微观响应机理上仍然存在许多困难，可能导致常规油气藏测井评价的许多理论和方法不能完全适用。所以，开展天然气水合物测井相关机理的研究以及专用仪器系统的研制是十分必要的。希望本书的出版能对这一领域的后续理论研究和仪器研制工作起到抛砖引玉的作用。

本书得到国家自然科学基金（基金编号：90510004）的大力支持。写作过程中参考了大量文献，特别是美国地质调查局和科罗拉多矿业学院专家们的研究成果。

由于作者水平有限，书中的不足和疏漏在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 天然气水合物研究概况	1
1.2 天然气水合物研究的目的和意义	9
1.3 天然气水合物研究的内容与方法	14
第 2 章 天然气水合物的地球物理性质与形成条件	15
2.1 天然气水合物的地球物理性质	15
2.2 天然气水合物的形成条件与分布	16
2.3 天然气水合物的重要地球物理标志——BSR	20
第 3 章 天然气水合物储层测井响应特征与定性识别	23
3.1 测井在天然气水合物储层评价中的应用	23
3.2 常规测井响应特征	28
3.3 电成像测井响应特征	34
3.4 核磁共振测井响应特征	39
3.5 天然气水合物储层的测井定性识别	44
第 4 章 天然气水合物储层参数的测井定量评价	51
4.1 天然气水合物储层多组分体积模型	52
4.2 储层孔隙度的计算	55
4.3 天然气水合物饱和度的评价	71
4.4 应用核磁共振评价天然气水合物储层	99
第 5 章 天然气水合物储层测井评价流程	116
5.1 概述	116
5.2 A 类储层与 D 类储层	118
5.3 B 类储层	122
5.4 C 类储层	124
第 6 章 结论与建议	125
参考文献	128

第 1 章 概 述

1.1 天然气水合物研究概况

1.1.1 天然气水合物简介

天然气水合物是在合适的温度（通常低于 300K）、压力（通常大于 0.6MPa）、气体饱和度、水的盐度和 pH 值等条件下，由水和天然气组成的、类冰的、非化学计量的笼形结晶化合物（Clathrate）^[1]。这种笼形化合物中，压缩的气体分子容纳于由水分子构成的固体晶格之中。气体分子通常被称为“客体分子”，水分子被称为“主体分子”。天然气水合物呈固相，区别于石油的液相和天然气的气相。

广义地讲，天然气水合物包括所有具有上述结构的笼形结晶化合物，分子式可用 $M \cdot nH_2O$ 来表示，M 代表水合物中的气体分子， n 为水合指数（水和气体分子的物质的量之比， $n \geq 5.67$ ^[2]）。甲烷、乙烷、丙烷、丁烷等同系物以及二氧化碳、氮和硫化氢等分子可以和水形成单种或多种天然气水合物。

自然界中形成天然气水合物的主要气体为甲烷（超过 90%）。甲烷分子含量超过 99.9% 的天然气水合物称为甲烷水合物（Methane Hydrate）^[3]，即狭义的天然气水合物概念。由于甲烷水合物在常温常压下遇火即可燃烧，人们形象地称之为“可燃冰”。甲烷水合物是能源行业最感兴趣的水合物，也是本书的主要研究对象，其笼形结构如图 1.1 所示。

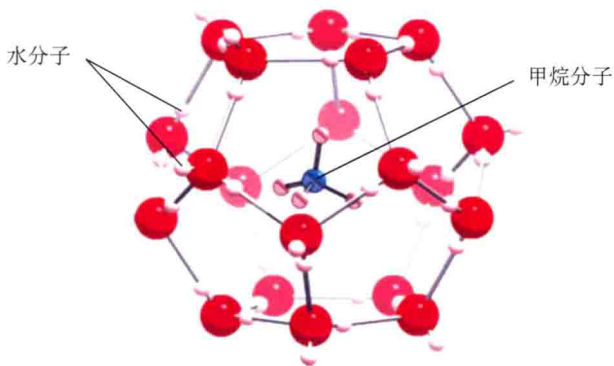


图 1.1 甲烷水合物的结构示意图

1.1.2 天然气水合物的晶格特征

海洋沉积物中的天然气水合物大部分为生物成因，只有少部分为热成因或混合成因^[4]。根据客体分子的尺度和单个水合物分子外形的不同，天然气水合物具有多种晶格结构，最常见的为结构 I 型、结构 II 型和结构 H 型三种^[1, 5, 6] (图 1.2)。

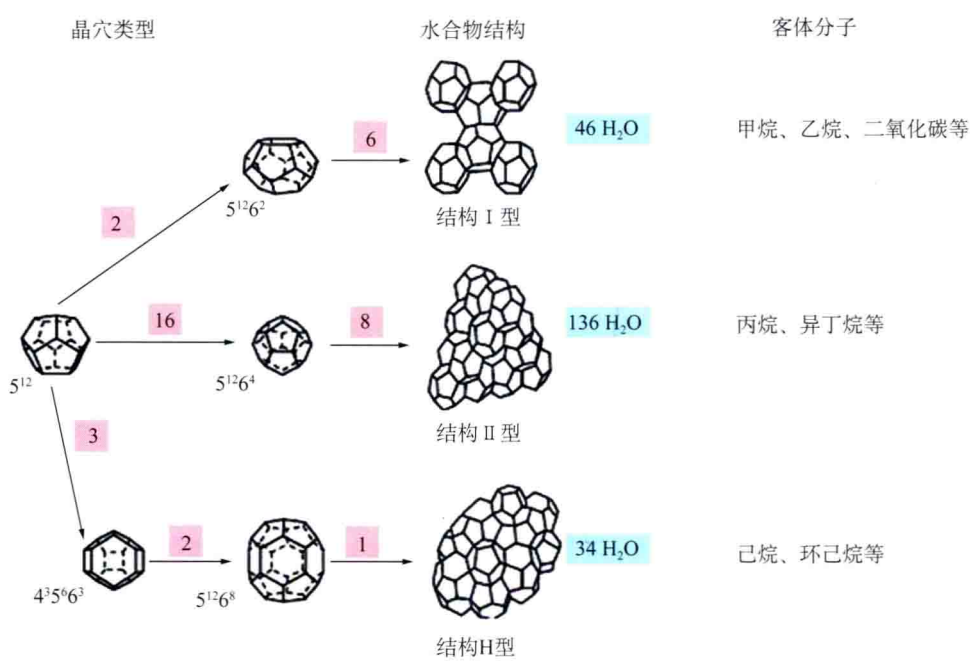


图 1.2 三种常见的水合物晶穴结构^[1]

笼形结构由 X^n 表示，如 $5^{12}6^4$ 表示一个笼形结构由 12 个五边形和 4 个六边形构成；图中正方形中的数字表示晶穴的数量，结构 I 型的晶穴由 2 个 5^{12} 、6 个 $5^{12}6^2$ 笼形结构和 46 个水分子组成

结构 I 型和结构 II 型的天然气水合物大约在 19 世纪 40 年代末和 50 年代初由 Stackelberg 等确定^[7]，结构 H 型由 Ripmeester 等于 1987 年确定^[8]。

(1) 结构 I 型（生物成因）：客体分子直径为 0.4 ~ 0.55nm，外形呈立方体结构，在自然界分布最为广泛。结构 I 型单晶结构包含 46 个水分子，由 2 个小晶穴和 6 个大晶穴组成。小晶穴为五边形十二面体（表示为 5^{12} ），大晶穴是由 12 个五边形和 2 个六边形组成的十四面体 ($5^{12}6^2$)。 5^{12} 晶穴由 20 个水分子组成，形状近似为球形。 $5^{12}6^2$ 晶穴是由 24 个水分子组成的扁球形结构。结构 I

型水合物的结构分子式为 $2(5^{12})6(5^{12}6^2) \cdot 46\text{H}_2\text{O}$ ，理想分子式（并非所有的笼形结构都必须被客体分子占据^[7]，理想分子式指所有晶穴都被客体分子占据，且每个晶穴只有一个客体分子）为 $\text{M} \cdot 5^{3/4}\text{H}_2\text{O}$ 。这种笼形结构里只能填充甲烷、乙烷等小分子烃，以及二氧化碳、氮和硫化氢等非烃分子。

甲烷的水合物反应可用下式表示：



(2) 结构Ⅱ型（热成因）：客体分子直径为 $0.6 \sim 0.7\text{nm}$ ，外形呈菱形立方结构，多存在于人工合成环境。自然环境中，在覆盖于油藏上部的天然气水合物储层中发现过结构Ⅱ型，如里海。结构Ⅱ型单晶包含 136 个水分子，由 8 个大晶穴和 16 个小晶穴组成。大晶穴为包含 28 个水分子的立方对称的准球形十六面体 ($5^{12}6^4$)，小晶穴为直径略小于结构Ⅰ型的 5^{12} 晶穴。这种结构除了能容纳Ⅰ型客体分子之外，还可以容纳丙烷、异丁烷等较大的烃类气体分子。结构Ⅱ型水合物的结构分子式为 $16(5^{12})8(5^{12}6^4) \cdot 136\text{H}_2\text{O}$ ，理想分子式为 $\text{M} \cdot 5^{2/3}\text{H}_2\text{O}$ 。

(3) 结构Ⅲ型：名称来自它的六方体（Hexagonal 首字母）结构^[7]，包含 3 个 5^{12} 、2 个 $4^35^66^3$ 和 1 个 $5^{12}6^8$ 晶穴，结构分子式为 $3(5^{12})2(4^35^66^3)1(5^{12}6^8) \cdot 34\text{H}_2\text{O}$ ，理想分子式为 $\text{M} \cdot 5^{2/3}\text{H}_2\text{O}$ 。这种结构必须同时包含小分子和大分子客体（直径 $0.8 \sim 0.9\text{nm}$ ），可存在于自然条件（如墨西哥湾^[9]和卡斯卡底古陆边缘^[10]）和人工合成环境中。

除了上述三种常见的晶格类型之外，新型的晶格结构正在不断地被发现，如结构Ⅳ型（Trigonal 首字母）型等^[11]。由于甲烷天然气分子能够形成结构Ⅰ型和结构Ⅱ型的天然气水合物，这两种结构在石油天然气工业中显得特别重要。

1.1.3 天然气水合物研究进展

1.1.3.1 国际天然气水合物发现和研究概况

国际科学界预测天然气水合物是石油和天然气的最佳替代能源。天然气水合物作为一种新型的、潜在的巨大碳氢能源库，具有很好的商业开采前景，各发达国家均开展了大量的研究工作。

为探测和评价自然界中的天然气水合物藏，著名的大洋钻探计划 ODP

[(Ocean Drilling Program, 现为综合大洋钻探计划 IODP (Integrated Ocean Drilling Program)) 和其前身——深海钻探计划 DSDP (Deep Sea Drilling Project) 组织了以大洋海底沉积物中的天然气水合物为主题的航次：1996 年在布莱克海台的 164 航次和 2002 年在水合物海岭的 204 航次^[12]。发达国家都有各自庞大的天然气水合物研究计划，美国、加拿大、德国、俄罗斯和日本等发达国家以及中国、韩国和印度等国家在该领域进行了大量的研究，从各个角度去探测天然气水合物的存在并评价其蕴藏量。

人类从发现天然气水合物开始直到大规模地将其作为一种能源资源，经历了将近 200 年的漫长过程，这段研究历史可分为四个阶段^[13-17]。

1) 实验室内的发现和研究阶段

最早在实验室合成的水合物为 1778 年英国化学家 Joseph Priestley 无意中获得的二氧化硫水合物^[18]。由于 Joseph Priestley 的工作没有形成足够的文献，因此天然气水合物的首次发现归功于 1810 年英国科学家 Humphry Davy (著名物理学家 Michael Faraday 的上司) 在伦敦皇家研究院合成氯气水合物^[13, 19]。Humphry Davy 于 1811 年著书首次提出“天然气水合物”一词。整个 19 世纪，水合物都是在实验室合成的，停留在实验探索的阶段，没有实际应用。

2) 工业界天然气水合物的防治阶段

实验室内的天然气水合物研究工作进行了 100 年之后，人们对自然界中存在的天然气水合物仍然了解很少。直到 20 世纪 20 年代，石油工业中使用管线从气田向外输送甲烷天然气，美国科学家 Hammersemidt 于 1934 年首次发现水合物堵塞了输气管道^[20]。这次发现使水合物研究进入新的时代，从此工业界开始介入天然气水合物的研究，主要目标是水合物的热力学生成条件和抑制方法等。1936 年，苏联科学院尼基丁院士发现并首次提出天然气水合物的笼形结构，并沿用至今。

3) 天然气水合物藏的发现和快速发展阶段

自然界中的天然气水合物早期发现主要为永久冻土带地区开发油气田、深海地球物理探测、海底取样调查和钻探发现。

1946 年，苏联科学家提出永久冻土带中存在天然气水合物稳定存在的条件^[18]。1965 年，苏联在西西伯利亚永久冻土地区发现麦索亚哈 (Messoyakh) 天然气水合物气藏，并于 1969—1970 年开始对该天然气水合物藏实施商业性开

采。麦索亚哈气藏是全球最早和目前唯一在天然气水合物含矿层系中进行商业生产的气藏，在全球引起了大规模的研究和勘探热潮。1971 年，Stoll 等首次发现海洋天然气水合物实物样品。1972 年，美国阿拉斯加州北部首次于永久冻土带中获得水合物岩心。

随着美国在阿拉斯加州、加拿大在麦肯齐河三角洲地区相继发现大规模天然气水合物藏，并发现海底似反射（Bottom Simulating Reflector, BSR）现象，天然气水合物进入大规模发现和发展阶段。1995 年，ODP164 航次在美国大西洋海域布莱克海台实施钻探，首次实现了“BSR 现象—天然气水合物稳定带—深海钻井—岩心样品与其工业性品位—资源潜量和商业开发价值评估”的多位一体验证。

4) 国家专项计划和工业化试验开发阶段

此阶段先后实施了天然气水合物的深海调查与钻探取证 [例如 DSDP/ODP 在南美洲和北美洲，日本于 1998—2001 年在南海海槽，德国于 1997、1999、2002 年在著名的“水合物脊 (Hydrate Ridge)”，美国于 2007 年在艾尔伯特山 (Mount Elbert) 等]，在深海、深湖（如里海、贝加尔湖）和永久冻土带获得了天然气水合物实物样品，为资源定量评估和开发计划奠定了基础。

天然气水合物的工业性开发试验以加拿大、美国、日本、德国与印度等国在加拿大麦肯齐河三角洲 (Mackenzie Delta) 的 Mallik 3L—38—Mallik 5L—38 井的工作为代表。该项目致力于提供世界上最详细的科学与工程数据来描述天然气水合物储层性质与生产过程，并利用加热法和减压法成功开展了短期（5 天）控制性试生产^[21]，是天然气水合物开发利用史上的里程碑。

自然界中的天然气水合物的发现始于 1965 年。表 1.1 列举了自然界中天然气水合物发现和研究的的重要事件^[13, 15, 22, 23]。

表 1.1 自然界中天然气水合物发现和研究的的重要事件

时 间	事 件
1965 年	Makogon 和 Coworkers 宣布在西伯利亚冻土带中发现天然气水合物
1969 年	Ginsburg 研究天然气水合物的地质环境
	苏联开始为期 10 年的麦索亚哈天然气水合物气藏的开采

续表

时 间	事 件
1972 年	ARCO-Exxon 公司在阿拉斯加州北部钻井中获得天然气水合物岩心样品
1974 年	Bily 和 Dick 报道加拿大麦肯齐三角洲的天然气水合物
	Stoll 等在分析海底地震剖面图时发现海底似反射 (BSR)
1980 年	Kvenvolden 发表世界范围内的天然气水合物调查报告
	Dillon 和 Paul 对大西洋中的天然气水合物进行研究
1983 年	Collet 发表 ARCO-Exxon 公司钻井中天然气水合物井段测井曲线的分析结果
1988 年	Makogon 和 Kvenvolden 分别估算出自然界中天然气水合物中所含甲烷量为 10^{16} m^3 [24]
1991 年	ODP 在太平洋西岸活动陆缘、美国西海岸、日本滨海、南海海槽等地发现天然气水合物
1994 年	Sassen 在墨西哥湾发现自然界中存在结构 H 型天然气水合物 [9]
1996 年	对 ODP 在 1986—1996 年间在大西洋、太平洋和地中海的 12 个站位取得的水合物岩心数据进行了微生物研究
1997 年	印度实施天然气水合物勘探计划
1998 年	对永久冻土带中的天然气水合物进行钻探、描述评价和生产测试
	中国正式以六分之一成员国加入 ODP
2000 年	美国国会发起甲烷水合物研究与开发运动 (Methane Hydrate R&D Act) [25]
2002 年	加拿大麦肯齐三角洲理查兹 (Richards) 岛的 Mallik-5L 国际永久冻土带开发试验说明, 高饱和度的天然气水合物可以经济地开发
	ODP204 航次在俄勒冈州 (Oregon) 水合物脊探测天然气水合物
2005 年	IODP 赴卡斯卡底 (Cascadia) 古大陆缘钻探天然气水合物
2006 年	印度国家天然气水合物计划 (HGHP) 获得 493 块天然气水合物岩心样品
2007 年	中国在南海神狐海域获得天然气水合物样品
	美国在艾尔伯特山永久冻土带探测天然气水合物
	韩国钻探获取天然气水合物 [23]
2009 年	中国青海祁连山冻土区发现天然气水合物, 钻取实物样品 [26]
2013 年	日本成功从海底天然气水合物中开采出天然气

国际上的天然气水合物调查研究重点正从资源调查逐渐向开发利用过渡,各国竞相提速天然气水合物开发和利用的进程。美国研发计划要求 2015 年实现商业性开发;日本也确立了 2016 年实现商业开采的目标。

1.1.3.2 中国海洋和冻土区天然气水合物的发现

我国在 20 世纪末开始关注天然气水合物的研究,在国家级探测和研究计划的支持下,这方面的研究发展十分迅速。随着近年来在南海海域和青藏高原永久冻土带发现天然气水合物藏并成功钻获天然气水合物岩心样品,我国已跻身天然气水合物研究调查研究的先进行列。

(1) 南海神狐海域。

历年来,我国对管辖海域进行了大量的地震勘查资料分析,广州海洋地质调查局在南海北部西沙海槽区开展的天然气水合物资源的前期调查中首次发现了我国天然气水合物存在的 BSR 标志;在日本冲绳海槽的边坡、我国南海的北部陆坡和西沙群岛南坡等地也发现了海底天然气水合物存在的 BSR 标志。通过对海底天然气水合物的成因、地球化学特征、地球物理特征、资料处理解释、钻孔取样、资源评价、海底地质灾害等方面进行系统的研究,取得了丰富的资料和大量的数据。

中国首次天然气水合物钻探活动 GMGS-1 由广州海洋地质调查局、中国地质调查局和国土资源部共同组织实施。2007 年 4 月 21 日至 6 月 12 日, Bavenit 号钻探船在中国南海神狐海域进行了 2 个航次共 8 个站位(图 1.3)的钻探和高分辨率小井眼测井。这 8 个站位处的水深达 1500m,其中 5 个站位附近钻有取心井,进行了原位状态下的测量和取样。不但在 3 个站位成功获得了天然气水合物样品,还确定了天然气水合物在沉积物中新的分布模式^[27, 28]。

此次钻探证实我国南海北部海域蕴藏着丰富的天然气水合物资源。我国首次获得了天然气水合物的地球物理测井、原位温度测量、沉积物岩心、孔隙水样品、微生物样品等信息,并取得了现场物性、地球化学等测试资料,为南海北部陆坡的天然气水合物资源远景评价、成藏机理和分布规律研究提供了可靠的科学依据,是中国地质史上一次重要发现。

我国在南海发现天然气水合物的神狐海域,是世界上第 24 个采集到天然气水合物实物样品的地区,第 22 个在海底采集到天然气水合物实物样品的地区,

第 12 个通过钻探工程在海底采集到水合物实物样品的地区。中国因此成为继美国、日本、印度之后第四个通过国家级研发计划获得水合物实物样品的国家，标志着中国的天然气水合物调查研究进入世界领先行列^[22]。



图 1.3 中国南海神狐海域天然气水合物钻探位置^[27]

(2) 祁连山冻土区。

我国冻土带面积达 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占国土总面积的 22.4%，是世界上仅次于俄罗斯和加拿大的第三冻土大国，冻土带中的天然气水合物资源潜力巨大。“我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查”地质调查项目对永久冻土带的地质、构造、气源和温压条件系统研究结果表明，青藏高原和东北冻土带具备较好的天然气水合物形成条件和找矿前景。其中，羌塘盆地是最有前景的找矿远景区，其次是祁连山木里地区、东北漠河盆地和风火山—乌丽地区等^[29, 30]。

2008—2009 年，中国地质调查局在青藏高原北缘的青海天峻县木里煤田聚乎更矿区实施“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”，完成钻探试验井 4 口，其中 3 口钻井钻获天然气水合物实物样品（图 1.4）。这是我国在永久冻土带首次钻获天然气水合物实物样品，也是全球首次在中低纬度高山冻土区发现天然气水合物实物样品。

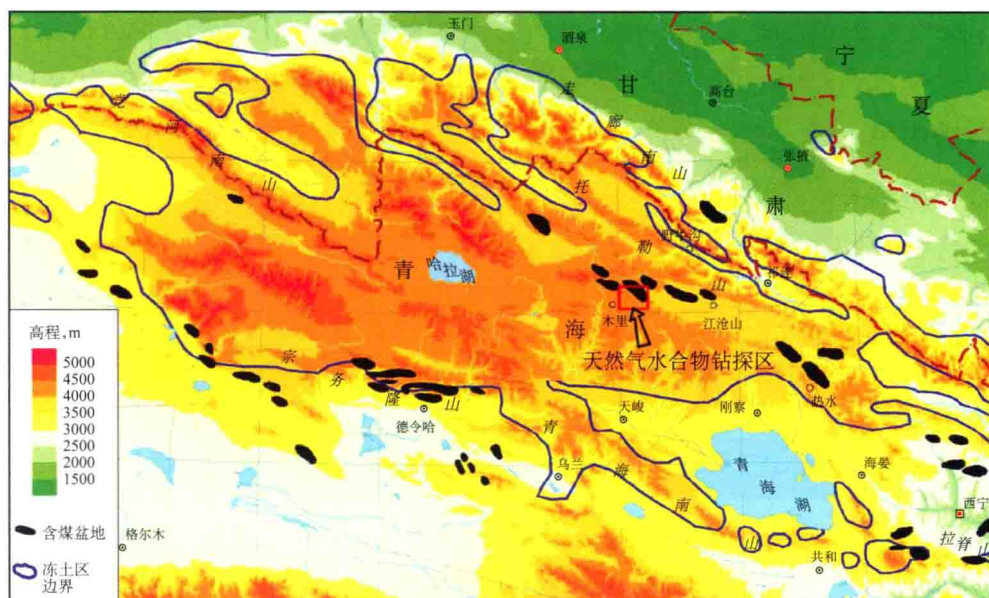


图 1.4 祁连山冻土区天然气水合物钻探试验区地理位置图^[26]

1.2 天然气水合物研究的目的和意义

近年来，天然气水合物成为国际科学界研究的热点，其根本原因是天然气水合物的重要属性及其在能源化工和环境领域中的重要意义。

(1) 天然气水合物是一种潜在的新型洁净能源。

天然气水合物的晶体结构和空间构架具有独特的高度集气能力。自然界中较难存在所有笼形结构都必须被客体分子占据（晶格占有率 100%）的天然气水合物，典型的晶格占有率为 70% ~ 90%。标准温度和压力条件下（STP），晶格占有率为 70% ($n=7.475$) 的 1m^3 甲烷水合物（结构 I 型）就可以释放出 139m^3 的甲烷气体，而晶格占有率为 90% ($n=6.325$) 的 1m^3 甲烷水合物（结构 I 型）则可释放出 164m^3 的甲烷气体^[31]，且分解所需要的能量不到其蕴含能量的 15%^[5]。

天然气水合物分解释放出的甲烷是一种相对清洁的碳氢化合物能源，甲烷气燃烧时释放出的污染物（二氧化碳、氧化氮、二氧化硫和微粒杂质）比石油和煤燃烧时要少得多。天然气水合物的能量密度（单位体积岩石的甲烷气含量）是常规天然气藏的 2 ~ 5 倍，是非常规油气藏（如煤层气、致密砂岩气、页岩

气和深层气) 的 10 倍^[32], 小规模的生产面积也可能具有极大的经济价值。

天然气水合物藏的分布广, 埋藏浅, 资源储量极为丰富。目前对全球天然气水合物中蕴含的天然气储量进行了大量推测性的估算, 不同的模型和方法得到的结果虽然存在差异, 但一致认为全球大洋海底和陆地上永久冰冻带中的天然气水合物中的甲烷含量非常高, 最保守的估计量与其他化石燃料所含的能量相比也是巨大的 (图 1.5)。天然气水合物储层下部还常常存在储量十分可观的天然气^[33]。有科学家大胆地推测, 天然气水合物中的碳含量是迄今为止地球上所有已知的煤、石油和天然气中碳含量的 2 倍^[3, 33]。

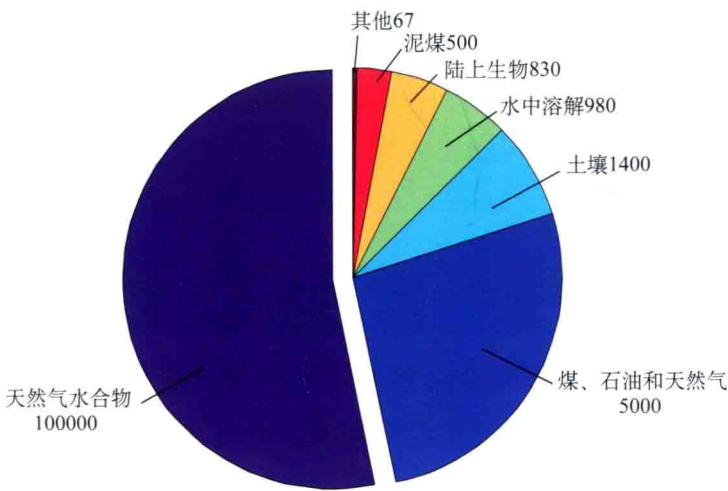


图 1.5 地球上已知有机碳的分布^[33](单位: $10^9 t$)

(2) 油气管道内的天然气水合物对油气输送安全有重大影响。

天然气水合物为固态非流动性的晶格结构。油气井产出的流体通常包含水和符合水合物客体分子范围的烃类, 因此常常形成水合物并堵塞油气管线 (图 1.6), 严重时导致停产数月。

油气管道中天然气水合物的分解首先从管道壁附近开始, 固态天然气水合物在分解产生的管内压力差驱动下快速运动, 有可能导致下游的气体被严重压缩, 造成管道爆裂、未完全分解的水合物在管道弯曲处再次堵塞管道等后果。

在海洋进行油气钻井作业时, 钻井液中生成的天然气水合物可能堵塞钻杆、防喷阀等, 阻碍钻井液的循环, 影响钻井安全 (图 1.7)。

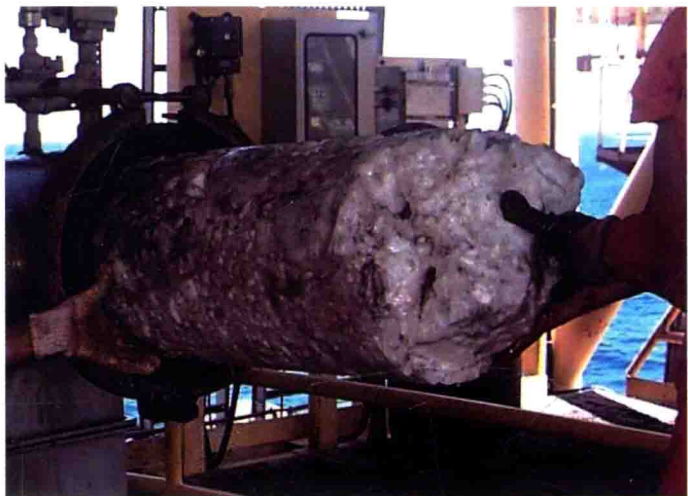


图 1.6 天然气水合物堵塞了油气管道^[19]

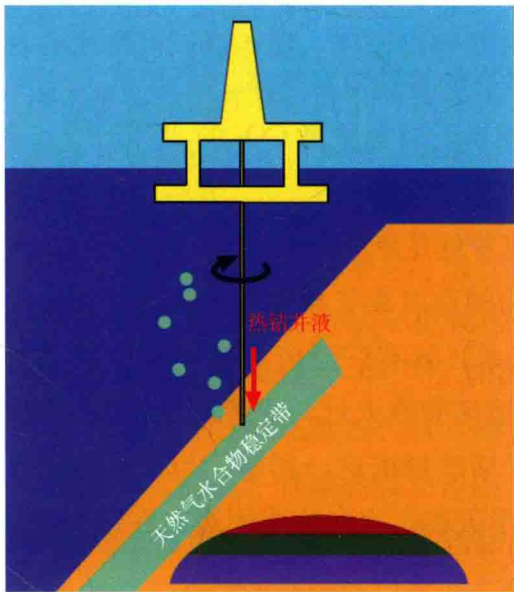


图 1.7 天然气水合物影响海洋钻井作业^[34]

(3) 自然原因和人为原因造成的天然气水合物分解具有较大的危害性。

天然气水合物是一种亚稳定态固体。天然气水合物稳定带内的地质条件变化造成的天然气水合物的分解可能导致海底垮塌和海底滑坡等灾害（图 1.8）。随着海洋钻探与采油技术的不断发展，油气工业的勘探开发范围也不断扩大和深入，在加强陆上寻找化石燃料的同时，开始向海洋进军。在海底天然气水合物储层进行人为钻井和生产时，可能会造成无法控制的大量天然气释放、固井失败和井场下沉等危险事故。

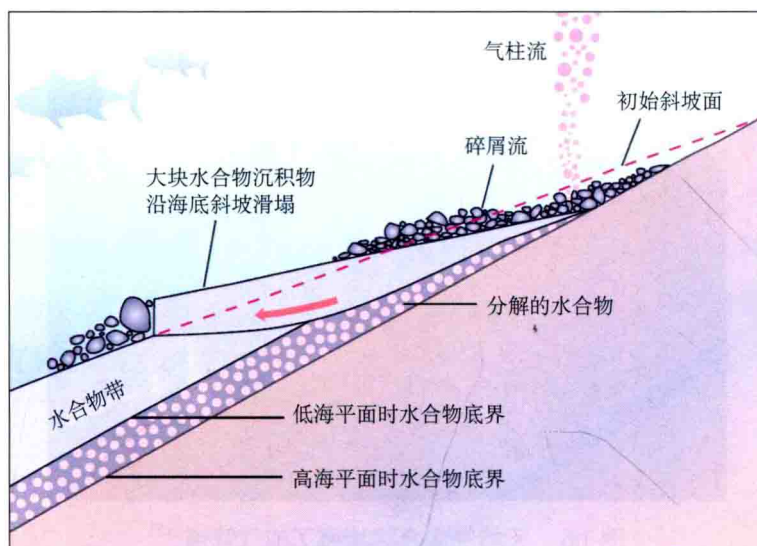


图 1.8 海底天然气水合物分解造成地质灾害示意图^[33]

(4) 甲烷是一种潜在的特殊温室气体。

甲烷的温室效应相当于同等质量 CO_2 的 20 倍^[25]。全球范围内天然气水合物含有的甲烷约为大气中的 3000 倍^[33]，天然气水合物在过去、现在和未来的全球气候变化中都扮演着重要角色。

(5) 天然气水合物的高度集气能力作为高效的天然气固态存储方法 (Gas-to-Solid, 简称 GtS 技术) 具有广泛应用前景^[35]。据估计，世界上天然气总储量中的 70% 或者距离输送管线太远，或者不足以就地建造天然气液化工厂^[1]，GtS 技术可以经济、灵活地解决这一问题。与 LNG 技术相比，GtS 技术可以节约约 25% 的成本。由于天然气水合物为固态，在遇到明火和泄漏等意外时更加安全。

(6) 天然气水合物的特殊形成机制在化工方面有一定的应用潜力，例如移除油气中的小分子烃组分、排除溶液中的盐类和其他杂质等。

无论从上述哪个角度来看，天然气水合物对人类的生产和生活都有很大影响。其影响的方式和程度取决于自然界中的天然气水合物的物理化学特性和资源量。随着全球油气资源需求的加大和技术的进步，今天的非常规油气资源可能变为将来的常规油气资源，现在不经济的资源将来可能变为经济的资源。由于天然气水合物储层的地质条件复杂，开采手段仍在研究之中。在可以预见的将来，天然气水合物一定能作为一种巨大能源经济地进行大规模商业开采。