



# 天然气水合物的 地球物理特征与测井数据的多尺度分析

郭宏著

非外借



科学出版社

# 天然气水合物的地球物理特征与 测井数据的多尺度分析

郭 宏 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

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系统研究。同时分析验证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。此外,从岩石物理体积模型出发,给出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。

本书可供从事地球物理,天然气水合物勘探,测井响应评价,测井数据分析等领域的科研人员、教师、工程师以及其他相关研发的人员参考阅读。

### 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数据的多尺度分析/郭宏著. —北京:科学出版社,2018.11

ISBN 978-7-03-059313-9

I. ①天… II. ①郭… III. ①天然气水合物-地球物理学 ②天然气水合物-测井数据 IV. ①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 251270 号

责任编辑:杜 权/责任校对:董艳辉  
责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

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>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本:720×1000 1/16

2018 年 11 月第 一 版 印张:11

2018 年 11 月第一次印刷 字数:230 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

近年来，随着石油天然气新探明储量的减少，资源短缺可能制约经济发展的问题引起广泛关注。寻找新的可替代能源成为当前全世界最急迫的科学技术研究课题之一。

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。

首先，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，论述天然气水合物储层在常规测井以及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系统研究，研究表明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。本书还通过多个实例分析验证常规油气藏评价方法在天然气水合物储层评价中具有较好的适用性。

其次，本书针对天然气水合物测井数据的离散性特征，通过对连续小波变换、离散小波变换和二进小波变换的研究，分析用于测井数据融合的多分辨率特性和二尺度方程，认为测井数据融合所用小波基必须具有正交性、正则性、紧支性、对称性等性质。

再次，本书研究测井曲线的小波变换方法，并根据边缘检测理论，构建边缘检测最优分割算法，实现测井曲线的小波多尺度分析，在此基础上构造测井曲线地层划分多尺度小波分析算法。结合测井信号特点，找出用于不同的测井曲线进行地层最佳划分的小波基与小波分解次数。并将此理论应用于祁连山冻土区天然气水合物探孔测井数据的融合与分析，实现存储层和地层的自动分层。

最后，本书根据测井曲线正交小波变换后的频谱特征可以表征沉积旋回的变化特性，建立识别准层序和准层序组内部沉积旋回类型的频谱响应模型；通过

不同尺度下测井信号的时频特征和突变特征，在最佳尺度下，根据小波系数曲线的周期振荡特征和多尺度边缘检测特性，与各级层序单元界面建立一定的对应关系，从而实现不同级别层序单元界面的定量划分。

本书得到国家专项协作课题“天然气水合物钻探地层流体取样与原位测试系统研发”（编号：GZH20160060202）的大力支持。写作过程中参考了大量文献，以及多位专家的研究成果。

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。

郭 宏

2018年6月18日

# 目 录

第 1 章 天然气水合物概述 .....	1
1.1 天然气水合物简介 .....	1
1.2 天然气水合物的理化性质 .....	1
1.3 天然气水合物组成结构 .....	2
1.4 天然气水合物形成原因 .....	3
1.4.1 海洋生成 .....	3
1.4.2 大陆生成 .....	5
1.5 天然气水合物分布范围 .....	5
1.6 天然气水合物研究现状 .....	6
1.6.1 国外天然气水合物研究现状 .....	6
1.6.2 我国天然气水合物研究现状 .....	7
1.7 天然气水合物勘探开采的风险和技术 .....	8
1.7.1 勘探开采的风险性 .....	9
1.7.2 勘探开采技术的研究 .....	11
1.8 我国天然气水合物研究策略 .....	12
1.8.1 正确认识天然气水合物在未来新能源领域中的地位 .....	12
1.8.2 建立一套长期有效的协调发展机制 .....	13
1.8.3 积极进行国家间的学术交流,学习先进技术 .....	13
1.8.4 从国家层面制定政策,促进天然气水合物的高效研发及利用 .....	13
参考文献 .....	14
第 2 章 天然气水合物的成因、分布及物勘探技术 .....	17
2.1 天然气水合物的地球物理性质 .....	17
2.2 天然气水合物的形成条件、资源分布及资源量 .....	19
2.2.1 天然气水合物的形成 .....	19
2.2.2 天然气水合物的资源分布及资源量 .....	21
2.3 天然气水合物的勘探方法 .....	25

2.3.1	地质勘探方法	25
2.3.2	地震检测	26
2.4	天然气水合物的测井技术	28
2.4.1	测井方法	28
2.4.2	测井解释	30
	参考文献	31
<b>第3章</b>	<b>天然气水合物储层测井响应特征与定性识别</b>	<b>33</b>
3.1	测井在天然气水合物储层评价中的应用	33
3.2	常规测井响应特征	35
3.2.1	密度测井响应特征	36
3.2.2	声波测井响应特征	36
3.2.3	电阻率测井响应特征	38
3.2.4	中子孔隙率测井响应特征	38
3.2.5	伽马测井响应特征	39
3.2.6	井径测井响应特征	39
3.3	其他测井响应特征	40
3.3.1	自然电位测井	40
3.3.2	井温测井	40
3.3.3	地层微电阻率扫描测井	40
3.3.4	核磁共振测井	41
3.4	天然气水合物定性识别	41
3.4.1	地震地球物理定性解释方法	41
3.4.2	地球化学定性解释方法	42
3.4.3	地质学标示定性识别	43
3.4.4	地球物理测井方法定性评价研究	44
3.5	测井方法在 ODP204 航次中的应用	46
3.5.1	ODP204 航次概述	46
3.5.2	测井方法在主要站点水合物定性识别中的应用	50
3.5.3	ODP204 航次天然气水合物储层测井响应特征值	54
	参考文献	54
<b>第4章</b>	<b>天然气水合物储层参数测井定量评价</b>	<b>57</b>
4.1	天然气水合物储量评价及储层模型	57
4.1.1	天然气水合物储量评价	57
4.1.2	天然气水合物储层模型	58

4.2 储层孔隙度评价 .....	59
4.2.1 电阻率孔隙度 .....	60
4.2.2 声波孔隙度 .....	62
4.2.3 密度孔隙度 .....	65
4.2.4 中子孔隙度 .....	68
4.3 储层饱和度评价 .....	71
4.3.1 电阻率测井评价方法 .....	71
4.3.2 声波测井评价方法 .....	75
4.3.3 碳氧比能谱测井评价方法 .....	78
4.3.4 电磁波测井评价 .....	82
4.4 储层核磁测井评价 .....	86
4.4.1 天然气水合物储层模型 .....	86
4.4.2 核磁测井方法计算孔隙度 .....	87
4.4.3 核磁测井方法计算天然气水合物含量 .....	88
参考文献 .....	91
<b>第5章 测井曲线的小波分析与多尺度检测 .....</b>	<b>94</b>
5.1 傅里叶变换与窗口傅里叶变换 .....	94
5.1.1 傅里叶变换 .....	94
5.1.2 窗口傅里叶变换 .....	95
5.2 连续小波变换 .....	96
5.2.1 小波母函数 .....	96
5.2.2 小波基函数 .....	96
5.2.3 连续小波变换函数 .....	96
5.3 离散小波变换 .....	97
5.4 信号的多尺度分析 .....	97
5.4.1 多尺度分析 .....	98
5.4.2 二尺度方程 .....	98
5.5 Mallat 算法 .....	100
5.5.1 Mallat 算法描述 .....	100
5.5.2 Mallat 分解算法 .....	101
5.5.3 Mallat 重构算法 .....	102
5.6 测井曲线的多尺度分析 .....	102
5.7 小波基的选取 .....	103
5.7.1 几种常用的小波基 .....	103

5.7.2	小波基的选取要求	108
5.8	基于小波变换的边缘检测	109
5.8.1	测井曲线奇异点的小波变换过零点判别	109
5.8.2	测井曲线奇异点的小波变换模极大值判别	111
5.9	测井曲线的多尺度分析实例	113
5.9.1	测井曲线的小波去噪分析	113
5.9.2	测井曲线多尺度分层	114
	参考文献	117
<b>第 6 章</b>	<b>测井曲线融合的水合物储层划分</b>	<b>119</b>
6.1	测井数据小波去噪预处理	119
6.1.1	基于小波分析的信号去噪原理	119
6.1.2	小波阈值去噪法对测井信号的处理	120
6.1.3	小波阈值的选取	120
6.1.4	小波阈值算法的改进	122
6.1.5	去噪效果的定量评价	122
6.1.6	测井曲线去噪实例分析	123
6.2	基于多尺度边缘检测的测井数据融合	124
6.2.1	基于小波多尺度边缘检测的融合算法	124
6.2.2	基于小波多尺度边缘检测的测井数据融合	126
6.2.3	实际测井资料应用效果与评价	128
6.3	测井数据融合的储层划分实例分析	130
6.3.1	祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程简介	130
6.3.2	祁连山冻土区天然气水合物测井响应	131
6.3.3	测井数据融合算法的实现	133
6.3.4	融合效果分析与评价	135
	参考文献	137
<b>第 7 章</b>	<b>基于测井多尺度分析方法的层序地层研究</b>	<b>138</b>
7.1	层序地层单元的划分	138
7.2	层序地层单元划分方法	139
7.2.1	测井曲线活度法	139
7.2.2	砂泥比曲线法	140
7.2.3	深度域频分析法	141
7.2.4	最大熵谱分析法	141
7.2.5	小波分析法	142

7.3 层序地层单元界面的测井响应特征 .....	142
7.3.1 准层序特征 .....	142
7.3.2 准层序组特征 .....	142
7.4 利用测井曲线划分沉积旋回 .....	143
7.5 用于层序地层划分的小波基选取 .....	144
7.6 常用小波基于层序地层划分 .....	145
7.6.1 Morlet 小波用于层序地层的划分 .....	145
7.6.2 Mexihat 小波用于层序地层的划分 .....	149
7.6.3 Gauss 小波定量划分层序地层单元 .....	154
7.7 基于测井多尺度数据融合的层序单元划分 .....	159
7.7.1 层序单元界面划分的理论依据 .....	159
7.7.2 层序单元界面划分方法 .....	160
7.7.3 层序单元划分实例分析 .....	161
参考文献 .....	164

# 第 1 章 天然气水合物概述

## 1.1 天然气水合物简介

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状的结晶物质。因其外观像冰一样而且遇火即可燃烧，所以又被称作“可燃冰”。其资源密度高，全球分布广泛，具有极高的资源价值，因而成为油气工业界长期研究热点。许多国家对天然气水合物做了大量研究和探索工作，取得了重要进展。迄今，人们已在近海海域与冻土区发现水合物矿点超过 230 处，涌现出一大批天然气水合物热点研究区。

2013 年 3 月 12 日，日本经济产业省宣布成功从日本近海地层蕴藏的天然气水合物中分离出甲烷气体<sup>[1]</sup>，这标志着日本的天然气水合物开采商业化进程迈出关键一步，这也是全球首次通过在海底分解“可燃冰”取得天然气。高度重视并加快天然气水合物研究开发，对于推进我国天然气工业发展、改善能源消费结构、保障能源安全供应、促进生态文明建设、保持经济社会可持续发展具有重要意义。

## 1.2 天然气水合物的理化性质

天然气水合物燃烧后几乎不产生任何残渣，污染比煤、石油、天然气都要小得多。 $1\text{ m}^3$ 可燃冰可转化为  $164\text{ m}^3$  的天然气和  $0.8\text{ m}^3$  的水。开采时只需将固体的天然气水合物升温减压就可释放出大量的甲烷气体。

天然气水合物在海洋浅水生态圈，通常出现在深层的沉淀物结构中，或是在

海床处露出。甲烷气水包合物据推测是因地质断层深处的气体迁移，以及沉淀、结晶等作用，与上升的气体流及海洋深处的冷水接触所形成。

在高压下，甲烷气水包合物在  $18^{\circ}\text{C}$  的温度下仍能维持稳定。一般的甲烷气水化合物组成为  $1\text{ mol}$  的甲烷及  $5.75\text{ mol}$  的水，然而这个比例取决于多少的甲烷分子“嵌入”水晶格各种不同的包覆结构中。 $1\text{ L}$  的甲烷气水包合物固体，在标准状况下，平均包含  $168\text{ L}$  的甲烷气体<sup>[2]</sup>。

$1\text{ m}^3$  的可燃冰可在常温常压下释放  $164\text{ m}^3$  的天然气及  $0.8\text{ m}^3$  的淡水，所以固体状的天然气水合物往往分布于水深大于  $300\text{ m}$  的海底沉积物或寒冷的永久冻土中。海底天然气水合物依赖巨厚水层的压力来维持其固体状态，其分布可以从海底到海底之下  $1000\text{ m}$  的范围以内，再往深处则由于地温升高其固体状态遭到破坏而难以存在<sup>[3]</sup>。

从物理性质来看，天然气水合物的密度接近并稍低于冰的密度，剪切系数、电解常数和热传导率均低于冰。天然气水合物的声波传播速度明显高于含气沉积物和饱和水沉积物，中子孔隙度低于饱和水沉积物，这些差别是物探方法识别天然气水合物的理论基础。此外，天然气水合物的毛细管孔隙压力较高。

可燃冰分子结构就像一个由若干水分子组成的笼子。

形成可燃冰有三个基本条件<sup>[4]</sup>：温度、压力和原材料。首先，低温。可燃冰在  $0\sim 10^{\circ}\text{C}$  时生成，超过  $20^{\circ}\text{C}$  便会分解。海底温度一般保持在  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$  左右。其次，高压。可燃冰在  $0^{\circ}\text{C}$  时，只需  $30$  个大气压即可生成，而以海洋的深度， $30$  个大气压很容易保证，并且气压越大，水合物就越不容易分解。最后，充足的气源。海底的有机物沉淀，其中丰富的碳经过生物转化，可产生充足的气源。海底的地层是多孔介质，在温度、压力、气源三者都具备的条件下，可燃冰晶体就会在介质的空隙间中生成。

### 1.3 天然气水合物组成结构

天然气水合物是一种白色固体物质，有极强的燃烧力，主要由水分子和烃类气体分子(主要是甲烷)组成，它是在一定条件(合适的温度、压力、气体饱和度、水的盐度、 $\text{pH}$  值等)下由水和天然气在中高压和低温条件下混合时组成的类冰的、非化学计量的、笼形结晶化合物(碳的电负性较大，在高压下能吸引与之相近的氢原子形成氢键，构成笼状结构)，如图 1-1 所示。一旦温度升高或压强降低，甲烷气则会逸出，固体水合物便趋于崩解。

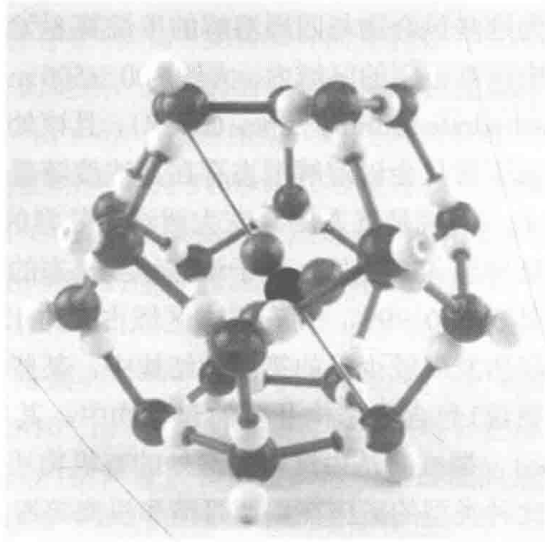


图 1-1 甲烷水合物结构示意图

天然气水合物,是天然气在  $0^{\circ}\text{C}$  和 30 个大气压的作用下结晶而成的“冰块”。“冰块”里甲烷占  $80\%\sim 99.9\%$ ,可直接点燃。可用  $m\text{CH}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  来表示,  $m$  代表水合物中的气体分子,  $n$  为水合指数(也就是水分子数)。组成天然气的成分如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{C}_4\text{H}_{10}$  等同系物以及  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等可形成单种或多种天然气水合物。形成天然气水合物的主要气体为甲烷,对甲烷分子含量超过  $99\%$  的天然气水合物通常称为甲烷水合物(methane hydrate)。每单位晶胞内有两个十二面体(20 个端点因此有 20 个水分子)和六个十四面体(tetrakaidcahedral)(24 个水分子)的水笼结构<sup>[5]</sup>。其水合值(hydratation value)20 可由固体核磁共振来求得。甲烷气水包合物频谱于  $275\text{ K}$  和  $3.1\text{ MPa}$  下记录,显示出每个笼形都反映出峰值,且气态的甲烷也有个别的峰值。

## 1.4 天然气水合物形成原因

### 1.4.1 海洋生成

天然气水合物有两种不同种类海洋存量<sup>[6]</sup>。最常见的绝大多数( $>99\%$ )都是甲烷包覆于结构 I 型的包合物,而且一般都在沉淀物的深处才能发现。在此结构下,甲烷中的碳同位素较轻( $\delta^{13}\text{C} \leq -60\%$ ),因此可以认为其是微生物由  $\text{CO}_2$  的氧化还原作用而来。这些位于深处矿床的包合物,一般认为应该是从微生物产生的

甲烷环境中形成,因为这些包合物与四周溶解的甲烷其  $\delta^{13}\text{C}$  值是相似的。

这些矿床坐落于中深度范围的区域内,大约 300~500 m 厚的沉积物中,称作气水化合物稳定带(gashydrate stability zone, GHSZ),且该处共存着溶于孔隙水的甲烷。在这区域之下,甲烷只会以溶解型态存在,浓度随着沉积物表层的距离而逐渐递减。而在这之上,甲烷是气态的。在大西洋大陆脊的布雷克海脊, GHSZ 在 190 m 的深度开始延伸至 450 m 处,并于该点达到气态的相平衡。测量结果指出,甲烷在 GHSZ 的体积占 0~9%,而在气态区域占大约 12%的体积。

在接近沉积物表层所发现较少见的第二种结构中,某些样本有较高比例的碳氢化合物长链(<99%甲烷)包含于结构 II 型的包合物中。其甲烷的碳同位素较重( $\delta^{13}\text{C}$  为  $-29\text{‰}$ ~ $-57\text{‰}$ ),据推断是由沉积物深处的有机物质,经热分解后形成甲烷而往上迁移而成。此种类型的矿床在墨西哥湾和里海等海域出现。

某些矿床具有介于微生物生成和热生成类型的特性,因此预估会出现两种混合的型态。

气水化合物的甲烷主要由缺氧环境下有机物质的细菌分解而形成。在沉积物最上方几厘米的有机物质会先被好氧细菌所分解,产生  $\text{CO}_2$ ,并从沉积物中释放进水团中。在此区域的好氧细菌活动中,硫酸盐会被转变成硫化物。若沉淀率很低(<1 cm/千年)、有机碳成分很低(<1%),且含氧量充足时,好氧细菌会耗光所有沉积物中的有机物质。但该处的沉淀率和有机碳成分都很高,沉积物中的孔隙水仅在几厘米深的地方是缺氧态的,而甲烷会经由厌氧细菌产生。此类甲烷的生成是更为复杂的程序,需要各个种类的细菌活动、一个还原环境(氧化还原电位为  $-350\sim-450\text{ mV}$ ),且环境 pH 值需介于 6~8。在某些海域(例如墨西哥湾)包合物中的甲烷至少会有部分是由有机物质的热分解所产生,但大多是从石油分解而成。包合物中的甲烷一般会具有细菌性的同位素特征,以及很高的  $\delta^{13}\text{C}$  值( $-40\text{‰}\sim-100\text{‰}$ ),平均大约是  $-65\text{‰}$ 。在固态包合物地带的下方处,沉积物里的大量甲烷可能以气泡的方式释放出来。

在给定的地点内判定该处是否含有包合物,大多可以透过观测“海底仿拟反射”(bottom simulating reflector, BSR)分布,以震测反射(seismic reflection)的方式来扫描洋底沉积物与包合物稳定带之间的接口处,因而可观测出一般沉积物和那些蕴藏包合物沉积物之间的密度差异。

海洋生成的甲烷包合物,蕴藏量鲜为人知。从 1960~1970 年起,包合物首次发现可能存在海洋中的那段时期,其预估的蕴藏量就每十年以数量级的概估速度递减。曾经预估过的蕴藏量高达  $3\times 10^{18}\text{ m}^3$ ,是建构在假设包合物非常稠密地散布在整片深海海床上的基础上。然而,随着我们对包合物化学和沉积学等知识进一步的了解,发现水合物只会在某个狭窄范围内(大陆棚)的深度下形成,以及某些

地点的深度范围内才会存在(10%~30%部分的 GHSZ 区),而且通常是在低浓度(体积的 0.9%~1.5%)的地点。最新的估计强制采用直接取样的方式,指出全球含量介于  $1 \times 10^{15} \sim 5 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 。这个预估结果,对应大约 500~2500 个十亿吨单位的碳(GtC),比预估所有矿物燃料的 5 000 GtC 数量还少,但整体上却超过所预估其他天然气来源的约 230 GtC。在北极圈的永冻地带,其储藏量预估可达约 400 GtC,但在南极区域并未估出可能的蕴藏量。这些是很大的数字,因为大气中的总碳数也才大约 700 GtC。

这些近代的估计结果,与当初人们以为包合物为矿物燃料来源时所提出的 10 000~11 000 GtC ( $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ),数量上明显要少。包合物藏量的缩减,并未使其失去经济价值,但缩减的整体含量和多数产地明显过低的采集密度,的确表明仅限某些地区的包合物矿床才能提供经济上的实质价值。

## 1.4.2 大陆生成

在大陆岩石内的甲烷包合物会受限在深度 800 m 以上的砂岩或粉砂岩岩床中<sup>[7]</sup>。采样结果指出,这些包合物以热力或微生物分解气体的混合方式形成,其中较重的碳氢化合物之后才会选择性地被分解。这类的型态存在于阿拉斯加和西伯利亚。

大陆岩石内的甲烷包合物储量比地球上石油的总储量还大几百倍。这些可燃冰都蕴藏在全球各地的 450 m 深的海床上,表面看起来,很像干冰,实际却能燃烧。

## 1.5 天然气水合物分布范围

天然气水合物在自然界广泛分布在大陆永久冻土、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境。

世界上已发现的海底天然气水合物主要分布区是大西洋海域的墨西哥湾、加勒比海、南美东部陆缘、非洲西部陆缘和美国东海岸外的布莱克海台等,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、四国海槽、中国南海海槽、苏拉威西海和新西兰北部海域等,东太平洋海域的中美洲海槽、加利福尼亚滨外和秘鲁海槽等,印度洋的阿曼海湾,南极的罗斯海和威德尔海,北极的巴伦支海和波弗特海,以及大陆内的黑海与里海等<sup>[8-9]</sup>。

在地球上大约有 27% 的陆地是可以形成天然气水合物的潜在地区,而在世界

大洋水域中约有 90% 的面积也属这样的潜在区域。已发现的天然气水合物主要存在于北极地区的永久冻土区和世界范围内的海底、陆坡、陆基及海沟中。由于采用的标准不同,不同机构对全世界天然气水合物储量的估计值差别很大。

据潜在气体联合会 (potential gas federation, PGC) 估计,永久冻土区天然气水合物资源量为  $1.4 \times 10^{13} \sim 3.4 \times 10^{16} \text{ m}^3$ , 包括海洋天然气水合物在内的资源总量为  $7.6 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 。但是,大多数人认为储存在汽水合物中的碳至少有  $1 \times 10^{13} \text{ t}$ , 约是当前已探明的所有化石燃料(包括煤、石油和天然气)中碳含量总和的 2 倍<sup>[10]</sup>。由于天然气水合物的非渗透性,常常可以作为其下层游离天然气的封盖层。因而,加上汽水合物下层的游离气体量这种估计值还可能会大些。如果能证明这些估计属实的话,天然气水合物未来将成为一种丰富的重要能源。

甲烷气水包合物受限于浅层的岩石圈内(即  $< 2000 \text{ m}$  深),发现在极地大陆的沉积岩,其表面温度低于  $0^\circ\text{C}$ , 或是在水深超过  $300 \text{ m}$ , 深层水温大约  $2^\circ\text{C}$  的海洋沉积物底下。大陆区域的蕴藏量已确定位于西伯利亚和阿拉斯加  $800 \text{ m}$  深的砂岩和泥岩床中。海生形态的矿床似乎分布于整个大陆棚,且可能现于沉积物的底下或是沉积物与海水接触的表面。他们甚至可能涵盖更大量的气态甲烷。

全球蕴藏的常规石油天然气资源消耗巨大,很快就会枯竭。科学家的评价结果表明,仅在海底区域,可燃冰的分布面积就达  $4 \times 10^{16} \text{ m}^2$ , 约占地球海洋总面积的  $1/4$ 。2011 年,世界上已发现的可燃冰分布区多达 116 处,其矿层之厚、规模之大,是常规天然气田无法相比的。科学家估计,海底可燃冰的储量至少够人类使用 1000 年<sup>[11]</sup>。

## 1.6 天然气水合物研究现状

### 1.6.1 国外天然气水合物研究现状

国外对天然气水合物的研究始于 1810 年,英国科学家 D. Humphery 在进行室内物理实验时发现了天然气水合物的存在。1888 年, V. Paul Ulrich 人工合成了天然气水合物(甲烷),人类对天然气水合物的重视程度逐渐增加。随着科学技术的发展和社会的进步,人类对天然气水合物研究的步伐逐渐加快。在随后的 200 余年的时间内,对天然气水合物开始进行广泛的研究,研究主要经历了以下几个阶段。

第一阶段是从 1810 年至 20 世纪 30 年代初。D. Humphery 于 1810 年在英国

伦敦皇家研究院实验室人工模拟并合成了水合物,并于1811年将其正式命名为“气水合物”<sup>[12]</sup>。此后,各国科学家先后合成了各种水合物。1888年,V. Paul Ulrich在实验室合成了 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 等的水合物<sup>[13]</sup>。但是,在此期间对“气水合物”的认识和研究仅仅停留在实验室阶段,并未有工业实质性的突破和进展。

第二阶段是从1934年至20世纪50年代。美国学者H. Hammer Schmidt发现了天然气水合物造成输气管道堵塞的工业有关数据,天然气水合物在管道中运输时所产生的负面效果加深了科学家对天然气水合物及其性质研究的兴趣<sup>[14]</sup>。在此阶段,天然气水合物的组成、相态平衡、结构、生成条件及各影响因素是人们的主要研究内容,研究的目的是预防和清除工业水合物<sup>[15]</sup>。

第三阶段是从20世纪60年代至今。在此阶段,全球范围内形成了对天然气水合物大范围勘探、普查、开发的格局。20世纪60年代到70年代,人们发现了以固态形式存在于地壳中的天然气水合物。1969年,苏联的麦索亚哈气田被发现并进行了可燃冰试采。1972年,美国在阿拉斯加北部的永久冻土层中取出水合物<sup>[16-18]</sup>。从20世纪80年代开始,人们进行了深海天然气水合物的研究,天然气水合物的研究也进入到了全面发展的新阶段,天然气水合物作为清洁、高效并且蕴藏量巨大的能源更加引起了全世界的关注,并进入到实际开发阶段。

全世界对天然气水合物的广泛关注使其成为一门新兴学科,研究内容主要包括天然气水合物的地球化学、地质学、区域工程地质学、天然气水合物地球物理调查等方面。美国、俄罗斯、日本、德国、印度、加拿大、中国、韩国等国家都相继制定了天然气水合物的研究开发战略部署。其中,日本是较为积极的国家,每年投入大量资金及技术人员进行调查研究<sup>[19]</sup>。2015年,日本投入超过300亿日元的经费用于深海矿藏能源、天然气水合物等资源勘查和技术研发。2016年,加拿大、美国及日本对本国的天然气水合物进行了工业开发,但存在的技术难题还有很多。天然气水合物的巨大工业价值激起了人们对不可再生能源新的需求。

天然气水合物的分布地点相对于其他能源有特殊之处,目前探明的天然气水合物所在地主要是沟盆、陆坡、深海盆地及北极地区。其中,海洋中的天然气水合物主要分布在西太平洋等海域;大陆中的天然气水合物主要分布在阿拉斯加北坡、我国青藏高原冻土带等<sup>[20]</sup>。

## 1.6.2 我国天然气水合物研究现状

国家统计局公布的数据显示,2015年,我国原油产量增加1.7%至历史最高点的 $2.15 \times 10^9$  t,天然气产量也达到了 $1.271 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>。但是,我国对能源的需求极大,