

国外油气勘探开发新进展丛书

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU



NATURAL GAS ENGINEERING HANDBOOK

天然气工程手册

[美] 郭博云 阿里·格兰伯 著
陈建军 陈晓玺 等译

石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书 (十)

天然气工程手册

[美] 郭博云 阿里·格兰伯 著

陈建军 陈晓玺 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍天然气工业概述,天然气生产和处理工艺所涉及的基础理论知识,天然气的特性,天然气的气液分离过程,天然气的脱水过程,天然气压缩和冷凝的基本原理,天然气的计量技术,天然气的管输原理和天然气生产过程存在的特殊问题。

本书适合从事天然气开采和处理的工程技术人员、高校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气工程手册 / [美] 郭博云, [美] 格兰伯著; 陈建军, 陈晓玺译.
北京: 石油工业出版社, 2012.9

(国外油气勘探开发新进展丛书: 10)

书名原文: Natural Gas Engineering Handbook

ISBN 978-7-5021-9024-8

I. 天…

II. ①郭…②格…③陈…④陈…

III. 天然气工程—技术手册

IV. TE64-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 076311 号

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书经 Gulf Publishing Company 授权翻译出版, 中文版权归石油工业出版社所有, 侵权必究。

著作权合同登记号图字: 01-2008-2831

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.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523562 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

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 21.25

字数: 538 千字

定价: 96.00 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

《国外油气勘探开发新进展丛书（十）》

编 委 会

主 任：赵政璋

副 主 任：赵文智 张卫国

编 委：（按姓氏笔画排序）

于兴河 马 纪 刘德来 李保柱

张仲宏 陈建军 周家尧 郭 平

章卫兵 梁永图

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺，推动中国石油上游业务技术进步，本着先进、实用、有效的原则，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量，对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进，并翻译和出版。

从 2001 年起，在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上，从生产需求出发，通过优中选优已经翻译出版了 9 辑 50 多本专著。在这套系列丛书中，有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平，有些非常具有实用性，也是生产中所亟需。这些译著发行后，得到了企业和科研院校广大生产管理、科技人员的欢迎，并在实用中发挥了重要作用，达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。部分石油单位统一购买并配发到了相关的技术人员手中。同时中国石油总部也筛选了部分适合基层员工学习参考的图书，列入“石油图书进基层活动”书目，配发到中国石油所属的 4 万个基层队站。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可，三次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”，形成了规模品牌，产生了很好的社会效益。

2012 年在前 9 辑出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出了国外最新出版的 6 本专著，即《油气储层表征》、《深水沉积过程与相模式》、《碳酸盐岩油气藏开发新技术》、《天然气工程手册》、《天然气开采工程》、《海底管道工程》，以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校人员，使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版，并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气股份有限公司副总裁



译者前言

近十年来,随着西气东输的实施,我国天然气工业步入快速发展阶段,形成了四川、长庆、塔里木三大天然气生产基地,青海、新疆、大庆、吐哈四个中型天然气基地。我国天然气地质特点决定了开发的气藏类型多种多样,包括低渗低丰度砂岩气田、深层异常高压气田、深层凝析气田,高含硫气田、疏松砂岩气田、火山岩气田、致密砂岩气田、碳酸盐岩气田、煤层气气田,这一定程度上反映了我国天然气开发工作的复杂性。今后一二十年我国天然气产业仍处在快速发展期,这些类型的气田仍将是我们的主要对象。在天然气产量快速增长的同时,天然气开发队伍快速扩大,很多新从事天然气开发工作的科研、管理、生产人员,迫切需要天然气开发方面的工具书,用于指导、解决工作中的开发问题。

在这样的背景下,我们翻译了美国路易斯安那大学的郭博云博士、阿里·格兰伯博士的《天然气工程手册》,本书以工具书的形式,系统地介绍了天然气开发各个环节的工作原理、关键参数的求取,书中附有大量的公式、图表、图版,具有很好的查询功能。全书共分十二章:第1章介绍天然气工业概况;第2章介绍天然气性质;第3章介绍气藏产能;第4、5、6章以井筒分析为主,介绍井筒动态、油嘴特性、气井产能;第7、8、9章以天然气处理为主,介绍天然气分离、脱水、压缩和冷却;第10章介绍天然气计量,第11章介绍天然气集输,第12章介绍特殊问题的解决。本书涉及天然气开发各环节,具有较强的系统性、基础性、实用性,是一本天然气开发工作者较为有用的工具参考书。

全书由陈建军、陈晓玺组织,陈建军、陈晓玺、王德建、苟燕、史建勋、胡庆松、张松、陈毓云等参加翻译。李海平、郭平、陈赓良、赵章明、万玉金、刘晓华、刘启国、崔玉峰、房爱兵、耿少娟、刘霞等对本书进行了审校,陈建军进行了统稿校对。在此,对参加本书翻译、校对并做出贡献的各位专家表示衷心感谢。

翻译中出现的不当之处,敬请读者批评指正。

译者

2012年元月

原 书 前 言

众所周知, 19 世纪是煤炭的时代, 煤炭伴随着欧洲工业革命的启动; 20 世纪是石油的时代, 石油伴随着全球经济的迅猛发展。随着世界经济对能源需求的不断增加, 能源短缺也成为了国际社会最为关注的问题, 能源短缺的结果将演变为严重的能源冲突。扩大能源供给, 促进石油转变到天然气, 最后转变到氢能, 是解决能源冲突的最佳方法。相比其他形式的能源, 天然气是唯一能兼顾经济发展和环境友好的能源。到 20 世纪末为止, 天然气已取代煤炭成为石油之后的第二大能源。2000 年, 全世界能源消耗量大约为 $40 \times 10^{16} \text{Btu}$, 其中石油占 39%, 天然气和煤分别占 23% 和 22%。历史发展进程表明: 石油向天然气的转换一定会在 21 世纪初发生, 这既是环境保护的驱动, 也是由于技术的进步和时代在发展。

自第二次世界大战以来, 天然气在民用、商用、工业和发电等终端用户的消耗量迅猛增加。天然气也是主要的化石燃料来源之一, 在 2000—2002 年, 天然气提供了美国整个能源的 24% 左右。即便是天然气工业高度成熟和有大量开采经验的美国, 依据信息来源不同, 其天然气潜在储量估计值在 $650 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 至 $5000 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 之间变化。2000 年, 美国潜在的天然气储量约为 $1050 \times 10^{12} \text{ft}^3$, 而加拿大约为 $170 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 。在全球范围内, 很难估算出天然气的总储量, 天然气主要产区位于前苏联、中东地区、亚太地区、非洲、北美、美洲南部和中部以及欧洲。自天然气工业诞生之日起, 天然气工程就支撑着天然气工业的发展。尽管已有大量的书籍和文献介绍了天然气工程的主要原理, 但绝大多数并没有全面反映出当前天然气工业的具体实践, 特别没有反映出计算机技术在工程设计和分析方面所起到的重要作用。本书填补了这方面的空白。

本书不仅包含了其他天然气工程书籍里的内容, 而且还依据笔者在大学多年的天然气工程方面的教学经验对相关内容进行了修改和完善。本书的宗旨是向天然气工程师提供便捷的工具指南, 帮助他们对天然气生产和处理工艺系统进行设计、分析和优化。本书适用于从事天然气生产和处理工艺的工程师以及大学本科高年级学生, 也可用做石油工程专业的高年级学生和研究生的参考资料。

本书囊括了天然气生产的整个工艺过程, 其内容按照天然气生产和处理的工艺流程进行编排, 共分 12 章, 第 1 章简述了天然气工业, 第 2 章列举了天然气生产和处理工艺所涉及的基础理论知识, 第 3 ~ 6 章详细介绍了天然气井的特性, 第 7 章专门介绍了天然气的气液分离过程, 第 8 章描述了天然气的脱水过程, 第 9 章介绍了天然气压缩和冷凝的基本原理, 第 10 章介绍了天然气的计量技术, 第 11 章介绍了天然气的管输原理, 第 12 章列举了天然气生产过程存在的特殊问题。附录 A 收录了无硫天然气的拟压力; 附录 B 收录了无硫天然气的标准压力; 附录 C 收录了天然气的孔板流量计; 附录 D 收录了气井除水的最小产气量; 附录 E 收录了气井中使凝析液产出所需的最小气体流量。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 什么是天然气	(1)
1.2 天然气的利用	(2)
1.3 天然气工业	(2)
1.4 天然气储量	(3)
1.5 天然气藏的类型	(3)
1.6 天然气工业的未来	(4)
1.7 参考文献	(6)
1.8 习题	(7)
第2章 天然气的性质	(8)
2.1 引言	(8)
2.2 相对密度	(8)
2.3 拟临界性质	(8)
2.4 黏度	(10)
2.5 压缩因子	(12)
2.6 天然气密度	(15)
2.7 地层体积系数和膨胀系数	(16)
2.8 天然气压缩率	(16)
2.9 真实气体拟压力	(17)
2.10 真实气体归一化压力	(19)
2.11 参考文献	(19)
2.12 习题	(20)
第3章 气藏产能	(21)
3.1 引言	(21)
3.2 解析法	(21)
3.3 经验法	(23)
3.4 构建井底流入动态曲线	(26)
3.5 参考文献	(29)
3.6 习题	(29)
第4章 井筒动态	(30)
4.1 引言	(30)
4.2 气井单相流	(30)
4.3 气井雾状流	(35)

4.4 参考文献	(37)
4.5 习题	(37)
第5章 油嘴特性	(39)
5.1 引言	(39)
5.2 声速和亚声速流动	(39)
5.3 干气流过油嘴	(40)
5.4 湿气流过油嘴	(46)
5.5 参考文献	(46)
5.6 习题	(47)
第6章 气井产能	(48)
6.1 引言	(48)
6.2 节点分析	(48)
6.3 参考文献	(54)
6.4 习题	(54)
第7章 天然气分离	(55)
7.1 引言	(55)
7.2 气液分离	(55)
7.3 多级分离	(65)
7.4 闪蒸计算	(65)
7.5 低温分离	(69)
7.6 参考文献	(70)
7.7 习题	(70)
第8章 脱水	(71)
8.1 引言	(71)
8.2 天然气脱水	(71)
8.3 去除酸性气体	(85)
8.4 参考文献	(87)
8.5 习题	(87)
第9章 天然气压缩与冷却	(88)
9.1 引言	(88)
9.2 压缩机类型	(88)
9.3 往复式压缩机的选择	(90)
9.4 离心压缩机的选择	(98)
9.5 旋转式鼓风机的选择	(101)
9.6 参考文献	(101)
9.7 习题	(102)
第10章 体积计量	(103)
10.1 引言	(103)
10.2 使用孔板流量计进行计量	(103)

10.3	其他计量方法	(110)
10.4	凝析油计量	(111)
10.5	参考文献	(112)
10.6	习题	(112)
第 11 章	天然气集输	(114)
11.1	引言	(114)
11.2	管线设计	(114)
11.3	参考文献	(137)
11.4	习题	(138)
第 12 章	特殊问题	(139)
12.1	引言	(139)
12.2	气井井筒积液	(139)
12.3	水合物防止	(147)
12.4	管道清管	(155)
12.5	参考文献	(170)
12.6	习题	(171)
附录 A	无硫天然气的拟压力	(172)
附录 B	无硫天然气的标准压力	(176)
附录 C	天然气的孔板流量表	(180)
附录 D	气井除水的最小产气量	(215)
附录 E	气井中使凝析液产出所需的最小气体流量	(266)
附录 F	SI 单位制换算	(317)
	术语	(318)

第1章 绪 论

1.1 什么是天然气

天然气属于石油类，是一种石油伴生气，通常是一种自然伴生的，由各种碳氢化合物，同时伴以少量的无机化合物组成的复杂的混合物。地质学家和化学家们都一致认为石油是由埋藏在地下的植物和动物的遗体变来的，这些动植物遗骸一般堆积在古代的沉积盆地或浅海或湖泊中，在漫长的地质年代里，经过一系列物理化学作用变化，形成富含有机物质的沉积岩，其中的原生有机质生物遗骸转化为石油。这种石油转化过程不难令人理解，其最重要的促成因素一般认为主要有以下几种：细菌作用、地层中的热力和压实作用、天然气的蒸馏作用，以及来自地层深部的氢类物质和长时间的催化、时间沉积过程（Allison, Palmer, 1980）。

表 1.1 为典型的天然气组分组成表。它表明，甲烷是这种混合气体的主要组成部分，而无机组成如氮气、二氧化碳和硫化氢，则希望其组分含量越少越好，主要是由于它们不可燃，并且在天然气生产和加工处理系统过程中容易造成腐蚀和其他问题。通常，天然气热值一般不尽相同，这主要取决于气体组分，特别是无机化合物的组成，其值通常为 $700 \sim 1600 \text{Btu/ft}^3$ 。

天然气成藏的地质圈闭可以归纳为储层、油气田和油气藏三类。储层是一类具有连通孔隙，能使一系列碳氢化合物圈闭在地层岩石和上覆水层下，并使其在其中渗滤的岩层，其特征就是具有单一的自然压力系统。油气田则是由一系列具有相似层状结构的储层组成，而油气藏则是由一个和多个相对独立的储层组成。在油田生产现场，井可分为气井、凝析气井和油井三大类。气井是指生产气油比大于 100000ft^3 （标准）/STB 的井；凝析气井则是指那些生产气油比小于 100000ft^3 （标准）/STB 而又大于 5000ft^3 （标准）/STB 的井；生产气油比小于 5000ft^3 （标准）/STB 的井则称为油井。

表 1.1 典型的天然气组分组成

组 分	摩尔分数	组 分	摩尔分数
甲烷	0.8407	正己烷	0.0028
乙烷	0.0586	碳烃重组分	0.0076
丙烷	0.0220	二氧化碳	0.0130
异丁烷	0.0035	硫化氢	0.0063
正丁烷	0.0058	氮气	0.0345
异戊烷	0.0027		
正戊烷	0.0025	总计	1.0000

由于天然气是气态的石油,因此它总是伴随着液态石油。目前有三种类型的天然气聚集类型:非伴生气、伴生气和凝析气。非伴生气体气藏原油含量极少。伴生气是指在自然条件下溶解在油藏中的天然气。凝析气是指液态烃含量较高的天然气,随着压力和温度的降低,会产出大量的液态烃。

1.2 天然气的利用

天然气是一个主要的化石能源。当 1ft^3 (标准) 的天然气燃烧时,它将产生 $700 \sim 1600\text{Btu}$ 的热量,这主要取决于气体成分。2000—2002 年,天然气约占美国能源组成的 24%。天然气作为一种能源应用于各个经济领域。图 1.1 表明 2000—2002 年天然气合理地分配在美国各经济领域(除了交通运输业)。

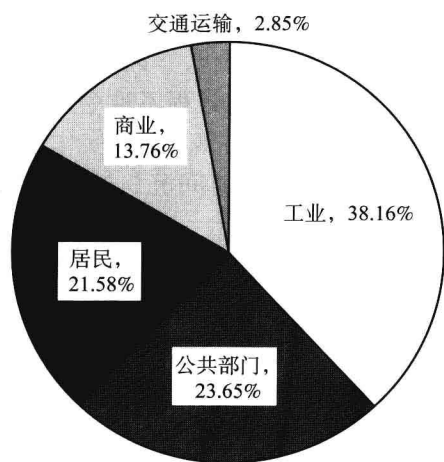


图 1.1 天然气作为能源应用于美国各经济领域
(资料来源:路易斯安那州自然资源部,2004)

那么需要燃烧的天然气为:

$$\{(4.57 \times 10^7 \text{Btu/d})/[1598 \text{Btu/ft}^3(\text{标准})]\}/50\% = 5.72 \times 10^4 \text{ft}^3(\text{标准})/\text{d}$$

例题 来自得克萨斯谢雷切均的天然气热值为 1598Btu/ft^3 (标准),假如该天然气完全燃烧产生 1000kW 的功率,问每天需要燃烧多少标准立方英尺的天然气?假设其总效率为 50% ($1\text{kW}=1903\text{Btu/h}$)

解:

发电机输出功率为:

$$\begin{aligned} 1000\text{kW} &= 1000\text{kW} \times 1903\text{Btu}/(\text{h} \cdot \text{kW}) \\ &= 1.903 \times 10^6 \text{Btu/h} = 4.57 \times 10^7 \text{Btu/d} \end{aligned}$$

1.3 天然气工业

天然气曾一度是原油的一个副产物。自从 1821 年天然气第一次在美国纽约州的弗里多尼亚被发现以来,其作为一种燃料已被迅速地应用在气田周边地区。在早期的天然气产业,天然气总是伴随着原油产生而产生,这就要求为天然气找到一个市场,或者直接燃烧掉。在缺乏有效考虑的条件下,天然气通常被作为一种无用的能源被大量地燃烧掉。因此,那个时代的天然气生产往往相当短命,天然气的购买价甚至低至 $1 \sim 2$ 美分/ 1000ft^3 (Ikoku, 1984)。

自第二次世界大战以来,天然气在民用、商业、工业和发电等方面的消耗增长迅速。这种增长来源于几个方面因素;其中包括新市场的发展,替代煤作为燃料为空间和工业过程提供热量,使用天然气生产石化产品和化肥,以及低含硫燃料的强烈需求。

如果没有来自遥远气田的进口天然气,西欧、日本和美国迅速增长的能源需求,将远远不能满足。天然气,通过一个制冷循环装置液化后,现在已经可以通过油轮高效率 and 快速地跨越大洋运送到大洋彼岸了。通过使用制冷循环装置液化天然气,从而减少其体积,利用海洋油轮运送到海外,就变成了一种经济上很具吸引力的运输方式。早在 1934 年,匈牙利就这样进行了一次小规模尝试,从 1951 年开始,美国就使用这种方式将天然气以液体形式从路易斯安那的油气田经密西西比河运送到芝加哥 (Ikoku, 1984)。

另一个类似的大规模的使用液态天然气运送的过程发生在美国本土以外。1964 年,英国和法国通过使用液化循环装置,将位于阿尔及利亚 Hassi R'mel 气田的天然气液化,然后将这种处理的液化天然气装载到经过特殊设计的油轮,出口运送到英国和法国。通过这种方式处理的天然气,其体积大约减少到其原有体积的六分之一,非甲烷组分几乎完全消除。在接收码头,液化天然气也可以通过气化工厂重新转换成气态,无论何时都可以被纳入燃气进口国。当然,它也可以被保存在油轮和地面油库中以供日后使用。除了其明显地用做一种可储存和易运输的燃料外,液化天然气还有许多应用,尤其是作为飞机和地面车辆的无污染的燃料。目前传统的生产来源方式已经远远不能满足天然气消费需求了。

1.4 天然气储量

探明储量和潜在储量经常被用来表示天然气储量。探明储量,是指那些已被钻探发现的天然气储量。它们可以通过已知油藏特征,如生产数据、压力关系和其他数据得到证实,以致可以准确地预测到天然气的体积储量。潜在储量是指被认为存在于地球地壳的各种岩石的,但尚未找到的天然气量构成。它们是探明储量的未来储备。

已有不同的方法用来估算潜在的天然气储量。一些估计方法主要是基于过去生产曲线、勘探进尺和发现率的增长来推算的,一些气藏发现或生产的经验模型也得到了发展,一些甚至转换成数学模型。按照天然气供应量与将要探明的石油储量的比例来估算天然气储量也作为一种方法得到应用。另一种办法是对潜在未钻探区块的容积评价,可以通过假设不同的限制条件来估算,如不同的钻井深度、近海水深、经济因素和技术因素等。

天然气的潜在储量和探明储量之间存在巨大的差距。即便是天然气工业高度成熟和有大量开采经验的美国,依据信息来源不同,其天然气潜在储量估计值在 $650 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 至 $5000 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 之间变化。2000 年,全美探明的天然气储量大约有 $1050 \times 10^{12} \text{ft}^3$,加拿大则为 $170 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 。就全球范围来说,更是很难对天然气储量给予很准确的估计。不像已探明石油储量,大部分(约 80%)被发现在石油输出国家组织(欧佩克)中,已探明的天然气储量主要在前苏联、中东、亚太地区、非洲、北美、中南美洲和欧洲。

1.5 天然气藏的类型

天然气可以分为常规天然气,致密砂岩气,致密页岩气,煤层气,在高压地质、水库的天然气,天然气水合物。

常规天然气,或是伴生气,或是非伴生气。伴生气或溶解气体总是与原油相伴而生的。

溶解气是指溶解在原油里的天然气,伴生气(有时所谓的气顶气)是指与原油接触的游离气。所有油藏都含有溶解气体,但并不一定含有伴生气。非伴生气是指气藏中原油含量极少的天然气。还有一些天然气则被称为凝析气或简称为凝析液,尽管它在地下是呈气态,却具有很高的液烃含量,在开采中,它们可以产生大量的液烃。

在美国,许多地区都具有符合致密砂岩气层定义的地层,这些地层渗透率在 $0.001 \sim 1\text{mD}$ 。现已发现的最大的致密砂岩气藏资源是在怀俄明州的绿河盆地(Green River)、科罗拉多州的皮安斯盆地(Piceance)和犹他州的安盟盆地(Unita)(Ikoku, 1984)。在较高的气体渗透率下,气层则一般可以进行常规的压裂。

致密页岩气藏主要发现于美国本土东部的几个地区(如肯塔基州、俄亥俄州、弗吉尼亚州、西弗吉尼亚州)。其中,肯塔基州东部和西弗吉尼亚州西部最为重要。页岩一般易破裂成薄片,并且颜色多样,主要是黑色、棕色、绿色或灰色。岩心分析测定页岩本身的孔隙率可高达 12%,而渗透率一般小于 1mD 。因此,确定页岩中主要产量受天然裂缝控制,也受层理面和节理的影响(Ikoku, 1984)。

煤层气是一种聚集在 3000ft 深度以下煤层中的甲烷气,尽管这种资源的估算量相当可观,但由于实际因素制约,这种类型的气藏资源开发可能会受到很大的限制。

在一个迅速沉积的盆地,黏土往往封闭下伏地层,并且圈闭了其中的流体。经过进一步下沉后,圈闭流体的压力和温度被超过了油气藏埋藏深度正常预期的温度和压力,这类气藏一般称为地压气藏,这在世界许多地方钻探油气时都有发现。在美国,主要位于墨西哥湾(Ikoku, 1984)沿海海域和陆地地带,这一带长度从佛罗里达州到得克萨斯州一路延伸,宽度约从深入内陆 100mile 处到海域大陆架的边缘。

天然气水合物,发现于 1810 年,是一种像雪一样的固体,其中每个水分子形式氢键与就近的四个水分子建立一个结晶晶格结构,形成一个气体分子圈闭结构(Sloan, 1990)。天然气水合物含量约为其在标准条件下体积的 170 倍。由于天然气水合物是一种高度集中形式的天然气,并且广泛地被发现在世界各地,它们被认为是未来的、非传统资源的天然气。

1.6 天然气工业的未来

众所周知,19 世纪,煤支持启动了欧洲的工业革命。20 世纪石油作为主要的能源来源,支持增长的全球经济。图 1.2 显示了世界能源过去 30 年的消费量,并且预测了其在未来 20 年的消费走势(能源部/环境保护组织,2001)。这表明世界经济对能源的需求量在不断提高。西蒙斯(2000)认为,能源短缺应该是一个“真正关心”的问题,在 2010 年,它很可能造成长期的能源短缺,最终将演变为一场严重的能源危机。

避免这种能源危机的方法就是扩大能源供给,利用石油、天然气,甚至氢气。天然气是一种优于其他能源资源的燃料,不仅在经济上具有很强的吸引力,而且对环境的危害也很小。在 20 世纪末期,天然气逐渐取代煤炭,成为仅次于石油的全球第二大能源。在 2000 年,全世界能源消费总量稍低于 $40 \times 10^{16}\text{Btu}$ 。其中,石油消费量占到 39%,而天然气和煤则分别贡献了 23% 和 22%(能源部/环境保护组织,2001)。这是一个历史性的推动作用,在 21 世纪初,必将完成从石油依赖到天然气依赖的转变。这不仅是出于环保考虑,而

且还有技术创新和技术改进的推动 (Economides, Demarchos, Saputelli, 2002)。

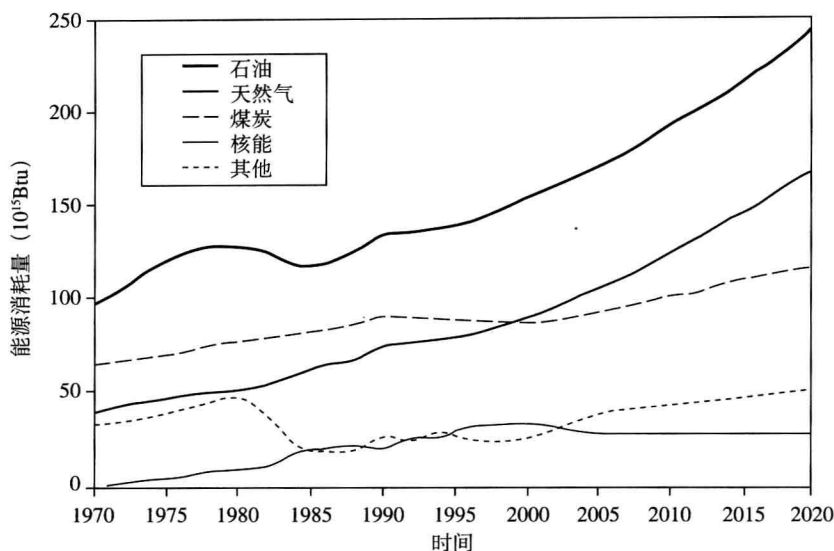


图 1.2 1970—2020 年世界能源消耗量及预测 (资料来源：能源部 / 环境保护组织, 2001)

美国是世界上最大的经济体，目前也是最大的能源消耗国。图 1.3 显示了在过去 30 年中美国的天然气生产情况。在过去 30 年中，美国天然气需求也可以从增加的天然气价格看出 (图 1.4)。据非常保守的估计 (能源部 / 环境保护组织, 2001) 显示，美国的能源需求，2000—2020 年将增加 30%，从 $9.8 \times 10^{16} \text{Btu}$ 增加到 $12.7 \times 10^{16} \text{Btu}$ ，天然气需求将增加 60% 以上，从 $2.25 \times 10^{16} \text{Btu}$ 至 $3.56 \times 10^{16} \text{Btu}$ ，或约 $35 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 。这就意味着天然气资源需求在整体能源体系中所占份额将会增加，从 23% 到超过 28%。很显然，天然气正逐渐成为全球

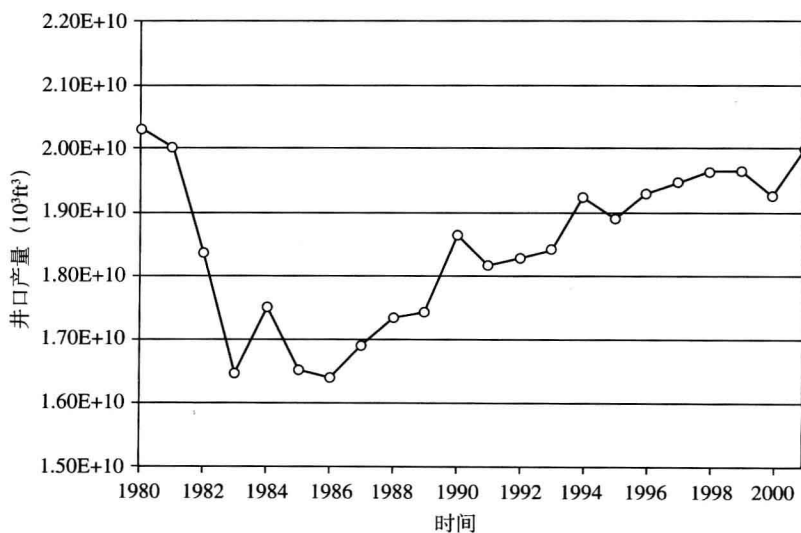


图 1.3 过去 30 年美国天然气产量 (资料来源：路易斯安那天然气资源研究, 2004)

经济主要的燃料选择, 其他所谓的替代能源与天然气资源很难同日而语。

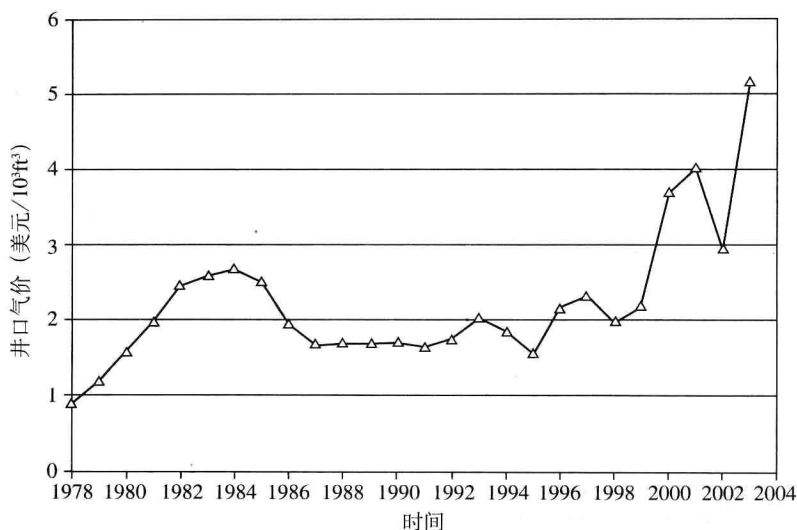


图 1.4 1978—2003 年美国天然气价格走势 (资料来源: 路易斯安那天然气资源研究, 2004)

1.7 参考文献

Allison, I.S. and D. F. Palmer. Geology. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 1980.

DOE/EIA. "International Energy Outlook." Energy Information Administration, Department of Energy, Washington DC, 2001.

Economides, M.J., A.S. Demarchos, and L.Saputelli. "Energy Sources and Energy Intensity for the Twenty-First Century." Paper SPE 75504 presented at the SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, Canada, April 30-May 2, 2002.

Economides, M.J., R.E. Oligney, A.S. Demarchos, and P.E. Lewis. "Natural Gas : Beyond All Expectations." Paper SPE 71512 presented at the 2001 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, September 30-October 3, 2001.

Ikoku, C.U. Natural Gas Production Engineering. New York : John Wiley & Sons, 1984.

Louisiana Department of Natural Resources. Louisiana Energy Facts.Baton Rouge, January 2004.

Louisiana Department of Natural Resources. Louisiana Energy Facts.Baton Rouge, March 2004.

Simmons, M.R. An Energy White Paper. Houston : Simmons and Company International, October 2000.

Sloan, E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. New York : Marcel Dekker Inc., 1990.

1.8 习 题

(1) 科罗拉多州摩根郡一类天然气，其热值为 1228Btu/ft^3 (标准)。如果这种气体燃烧，驱动一个为 1000hp 的天然气压缩机的燃气轮机，每天所需的天然气量是多少？假设整体效率是 30% ($1\text{hp}=2544\text{Btu/h}$)。

(2) 北达科他州威廉县一类天然气，其热值为 1032Btu/ft^3 (标准)。如果该天然气用来发电，假设每天的气体流量为 $1 \times 10^6\text{ft}^3$ (标准)，假设整体效率是 50% ，发电机将产生多少瓦的电力 ($1\text{hp}=745\text{W}$)？