

国外油气勘探开发新进展丛书

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU



NATURAL GAS PRODUCTION ENGINEERING

天然气开采工程

[美] 莫汉·科尔卡 著
郭平 汪周华 杨依依 等编译
刘永辉 孙良田 审校

石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书 (十)

天然气开采工程

[美] 莫汉·科尔卡著

郭平 汪周华 杨依依 等编译

刘永辉 孙良田 审校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对天然气开采现场工程技术人员的需要,是在长期培训基础上完善而成的教材,重点讲述天然气生产过程中涉及的天然气性质、物质平衡、气井生产系统、气体压缩、气体测量等内容。

本书可作为天然气开采的现场工程技术人员、高校本科生及研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气开采工程 / [美] 科尔卡 (Kelkar, M.) 著; 郭平等编译
北京: 石油工业出版社, 2013.3

(国外油气勘探开发新进展丛书, 第10辑)

书名原文: Natural Gas Production Engineering

ISBN 978-7-5021-9322-5

I. 天…

II. ①科…②郭…

III. 采气

IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 059520 号

Copyright © 2008 by Penn Well Corporation. All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, without the prior written permission of the publisher.

本书经 Penn Well 公司授权翻译出版。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: 01-2010-3912

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

2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 23.25

字数: 548 千字

定价: 90.00 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 and 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



目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 天然气需求量.....	(2)
第二节 天然气的供应.....	(4)
第三节 天然气的运输.....	(5)
第四节 天然气的性质.....	(8)
第五节 非常规天然气资源.....	(8)
参考文献.....	(13)
第二章 天然气的性质	(15)
第一节 相态.....	(15)
第二节 物理性质.....	(22)
第三节 产液影响.....	(34)
第四节 实验.....	(42)
参考文献.....	(60)
第三章 物质平衡分析	(62)
第一节 基本方程.....	(63)
第二节 体积膨胀.....	(65)
第三节 水侵.....	(76)
第四节 煤层甲烷气藏的物质平衡方程.....	(93)
参考文献.....	(109)
第四章 流入动态曲线	(111)
第一节 物质平衡方程.....	(111)
第二节 流动状态.....	(113)
第三节 稳态流动.....	(115)
第四节 拟稳态流.....	(116)
第五节 近井眼区域变化.....	(119)
第六节 非达西流效应.....	(125)
第七节 压裂井的流入动态.....	(137)
第八节 水平井的流入动态.....	(146)
第九节 基于现场测试的流入动态.....	(155)
第十节 底水锥进.....	(163)
第十一节 射孔.....	(171)
第十二节 砾石充填完井.....	(177)
第十三节 压裂充填完井.....	(179)

参考文献	(182)
第五章 管流和节流	(185)
第一节 单相流动	(185)
第二节 出液	(203)
第三节 节流处的压降	(220)
第四节 冲蚀速度	(232)
参考文献	(236)
第六章 生产系统	(240)
第一节 油管的影响	(243)
第二节 井口压力的影响	(246)
第三节 积液	(250)
第四节 射孔	(258)
第五节 砾石充填	(261)
第六节 冲蚀速度	(263)
第七节 注入井	(265)
第八节 历史拟合	(267)
第九节 动态系统分析	(274)
参考文献	(278)
第七章 气体压缩	(280)
第一节 压缩机的应用	(280)
第二节 分类	(281)
第三节 压缩原理	(284)
第四节 压缩机设计	(291)
第五节 压缩机的评价	(299)
第六节 气井动态	(317)
参考文献	(324)
第八章 气体的测量	(326)
第一节 差压流量计	(326)
第二节 其他的测量仪器	(335)
参考文献	(340)
附录	(341)

第一章 绪 论

学习目标:

- (1) 了解天然气作为一种越来越重要的能源资源。
- (2) 讨论天然气在未来的需求与供给关系。
- (3) 调查非常规能源对天然气供应的贡献。

天然气作为一种燃料已经使用了 150 多年。尽管天然气作为燃料使用已经很长一段时间，然而在最近它作为一种重要的能源供应的重要性才变得显著起来。当天然气作为一种油田伴生气生产时很少能有效地利用。在大多数情况下，人们认为石油生产是重要的，天然气生产是一件麻烦的事情。部分天然气只作为油田的能源供应，剩余的天然气点火燃烧。甚至在今天，在世界的很多地方这种方法仍然在使用。石油公司燃烧天然气的部分原因是它不容易储存。只要天然气一生产出来就必须立即使用或输走。如果最终的用户离得很远，在天然气从一个地方运输到另一个地方之前，必须建立起一个有效的基础设施。在很多地方，建立运输系统的花费是很值得的。处理油田伴生气的另一种方法是把它再注入油田中。再注入能够增加储层压力，因而增加石油产量。但是这种方案需要钻注入井，使用压缩机注入气体。而且，如果出售这些天然气，可能延长现金流的周期。

由于这些困难，伴生天然气作为一种重要的能源来源并没有得到普及。然而，在过去 25 年中，天然气的重要性有所增加。从 25 年前，占世界总能源供应的 17%，到今天天然气供应占世界总能源的 22%。相比之下，原油提供了占世界大约 39% 的能源。天然气日益重要的原因是：

(1) 重大基础设施管道和压缩机站正在建设，或者已经建成。特别是在美国，大部分地区已经有基础设施管道。随着最近美国联邦解除管制，这样更容易生产者出售天然气给最终用户，而不用出售天然气管道。在 2000 年，世界上消费的 22% 的天然气是通过国际边界输送的。最近一年，通过国家边界输送的天然气增长比率平均达到 8%。大批的国际输送管道已经规划或者已经正在施工。这些管道包括从俄罗斯到欧洲，俄罗斯到中国和阿根廷到巴西。在过去的 20 年，很多输送管道已经建成完工或者正在计划从一个国家输送气体到另一个国家。在全世界范围内的天然气输送量从 1970 年的 $1.8 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($51 \times 10^9 \text{m}^3$) 增加到 1995 年的 $9.0 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($255 \times 10^9 \text{m}^3$)。

(2) 天然气是一种环保型燃料。与石油或者煤炭相比，天然气作为一种矿物燃料能更有效地燃烧。这与煤或石油不同，从燃烧气体中释放出来的对环境有害的副产品数量有限。如果充分燃烧，释放到大气中的副产品仅有二氧化碳和水。此外，用于发电为目的，每单位的电相对产生的二氧化碳，煤炭为 1，石油大约为 0.7，天然气为 0.5。可以看出，天然气作为燃料用于发电放出的二氧化碳最少。如果世界各国政府改变政策设定二氧化碳排放量的上限，那么天然气代替煤炭成为主要的矿物燃料将成为可能。

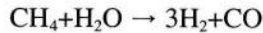
(3) 在能源等效性方面,天然气以较低的价格出售。大约 $6 \times 10^3 \text{ft}^3$ (170m^3) 的天然气和 1bbl (0.159m^3) 原油是等效的。然而,在价格方面, $1 \times 10^3 \text{ft}^3$ 天然气的价格和 $0.1 \sim 0.12 \text{bbl}$ 原油的价格相当。也就是说,在价格方面, $8 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3 \text{ft}^3$ ($227 \sim 283 \text{m}^3$) 天然气相当于 1bbl 原油。因此天然气以低价格出售,和其他能源相比它是较便宜的。

(4) 天然气的价格不受与石油相同的地缘政治压力的影响。不像石油是一种全球性的商品,天然气的价格更多的受到区域因素控制。不论你在什么地方购买石油,它的价格在世界的任何地方是相同的。由于天然气的运输更加困难,它的销售更多的是在区域基础上而不是在全球性基础上。因此,控制天然气价格的是地区性问题而不是全球性问题。所以,天然气价格比石油价格更有可预测性。对于以规划为目的,对未来价格的预测更少的不确定性比更多的不确定总是好。天然气作为一种商品比石油更适合预定。

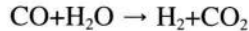
(5) 新技术的发展能够促进天然气的使用,可作为供热燃料或者石油化工厂的原料。随着发动机的改进,天然气也可以作为发动机的燃料。很多学校和地方的公交车经过改装后能够使用天然气作为燃料。这样的发动机对环境污染小而且高效。该技术通过不断的研发可能会导致天然气作为常规发动机燃料应用于长途旅行。

(6) 天然气的另一种潜在用途是作为燃料电池发电的燃料。随着我们实现以煤炭为基础燃料到以氢为基础燃料的转变,燃料电池有望在新的能源经济中占统治地位。天然气是产生发电氢的一种理想来源。

甲烷重整是生成发电氢最通用的方法,水蒸气和甲烷在大约 1480°F (800°C) 的温度和 600psia (4137kPa) 的压力条件下,通过催化剂 Ni 的作用发生反应。初次反应方程如下:



在一个替换反应中一氧化碳进一步转变成二氧化碳:



这个反应发生在 800°F (425°C) 的温度且氧化铁的催化作用下。通过胺洗把二氧化碳与氢气分离。假如未来氢成为一种可选择的燃料,预计天然气的需求量将有较大的增加。

(7) 就未来世界能源需求来看,最大的需求预计是在发电方面。在未来 20 年,每年电力需求的增长率预计超过 2%。使用天然气比使用其他任何燃料都要好,因为它具有较低的固定资产投资,较低的运行费用,较高的热效率,较高的操作灵活性,较少的二氧化碳和氮氧化物的排放量,没有硫化物或其他特殊气体排放,较短的建设时间,较小的占地面积。以最新的联合循环气体技术为例,与常规 38% 的热效率相比,预计它可以达到 50% 的热效率。基于保护环境和提高效率,与 1999 年各自占到 14% 和 13% 相比,到 2020 年,在发达国家,天然气占电力市场的份额将达 24%,在发展中国家将达到 21%。

第一节 天然气需求量

在过去的几年里,天然气的需求量一直在稳定的增加(图 1-1)。在 2004 年,天然气的世界消耗量是 $100 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($2.83 \times 10^{12} \text{m}^3$)。基于燃料电池技术不会对燃料输送有重大贡

献的假设，图中预测了未来的需求量。如果燃料电池技术确实变得可行，那么天然气的需求量甚至比图中预计的更多。

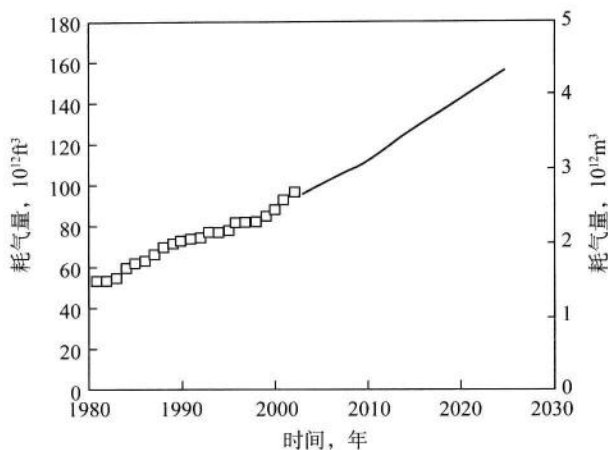


图 1-1 天然气的历史需求量

预测天然气未来的需求量是非常困难的，因为它取决于几个因素。从全球性能源需求看（图 1-2），天然气的需求量预计从 2000 年的 $382 \times 10^{15} \text{Btu}$ ($419 \times 10^{15} \text{kJ}$) 增加到 $612 \times 10^{15} \text{Btu}$ ($645 \times 10^{15} \text{kJ}$)，总计增加了 60%。从图 1-2 中看出，世界上的能源需求增长是不均匀的。在发展中国家需求量的增加是非常快的（在过去的 20 年中增加了 115%），然而，在发达国家需求量的增加缓慢（在过去的 20 年中增加了 33%）。能源需求量的变化对天然气需求量有重要影响，而天然气的运输问题是满足需求量的一个重要障碍。

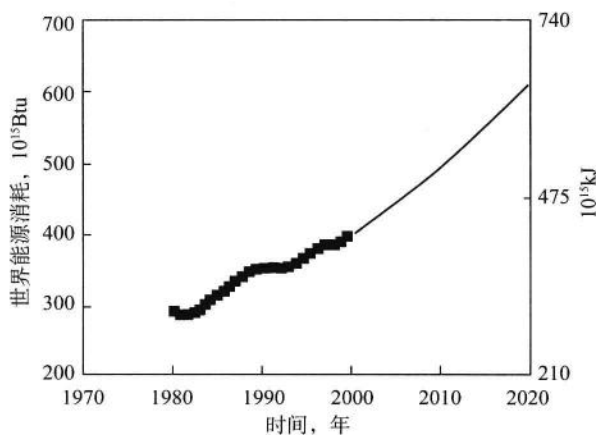


图 1-2 全球性能源需求

天然气的需求量预计从 2004 年的 $100 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($2.83 \times 10^{12} \text{m}^3$) 增加到 2020 年的 $162 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($4.59 \times 10^{12} \text{m}^3$)（图 1-1）。这是天然气需求量最准确的预测。取决于燃料电池技术的商业化，一些天然气消耗量的评估方案预计此数据高达 $200 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($5.66 \times 10^{12} \text{m}^3$)。甚至更令人感兴趣的调查是如图 1-3 所示，天然气提供世界能源的百分比。在 2000 年，

22%的世界能源由煤和天然气提供,但是,煤提供的能源百分比随后有一个缓慢的下降。到2020年,煤炭预计仅提供世界能源需求量的19%,而天然气提供世界能源需求量的28%。在这段时间内,石油提供的能源份额预计保持在39%。但是,如果燃料电池技术变得可行,天然气将变得和石油一样重要,天然气和石油将分别提供世界能源份额的32%。

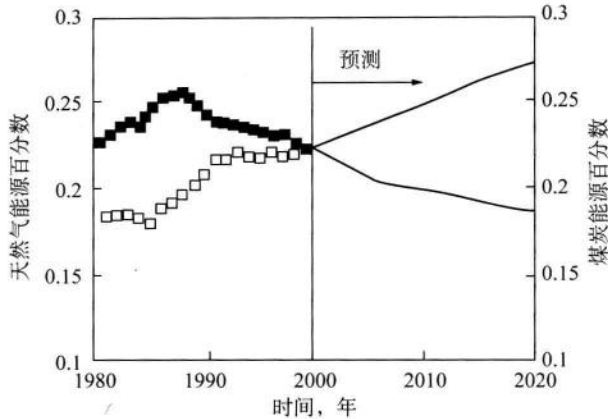


图 1-3 天然气和煤炭的需求量预测

第二节 天然气的供应

直到2005年,被证实的天然气储量是 $6400 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($181 \times 10^{12} \text{m}^3$)。在过去的20年里,注意到一个有趣的现象,在全球性基础上,每年发现的天然气储量比消耗的天然气量多了近4倍。在过去的20年里,估计储量增加了90%。除了技术提高之外,由于对勘探天然气更加重视而不仅仅是靠偶然性发现天然气也是一部分原因。

虽然,世界范围内,天然气储量的生产年限估计是60年(相对于原油是40年),但是,地区性储量的生产年限变化很大。例如,美国的天然气储量生产年限是10年,而美国中部和南部是72年,苏联是80年,中东则超过100年。这些生产年限的变化表明,天然气在不同的地方消耗不仅仅是它的产地,而是因为基础设施建设的不同,还有天然气消耗量的不同所致。以目前可利用的数据为依据,俄罗斯被证实的储量占世界储量的30%,而中东被证实的储量占世界储量的35%。美国仅仅占有世界储量的3.3%,却消耗了世界天然气生产量的25%(在2005年)。从图1-4中可以看出,在2005年,使用有效钻井设备的数量达到1200,在美国天然气产量保持不变或缓慢下降。下降的原因是每一年的新井产量以每年25%的平均比率下降。结果,仅仅是老井的递减产量就需要钻大量的新井。

天然气的消费量和供应量的不平衡估计会进一步增大。据估计,全球将发现 $5200 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($147 \times 10^{12} \text{m}^3$)的天然气。超过一半的未被发现的天然气估计来自苏联、中东和北美。预计在美国北部、中部和南部发现大约 $1170 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($33 \times 10^{12} \text{m}^3$)的天然气。如果从历史数据中得到的消费预期的趋势并没有重大的改变,各区域的储备生产比将变化更大。把天然气运输到需要它的地方唯一的方法是提高国际间的基础设施。

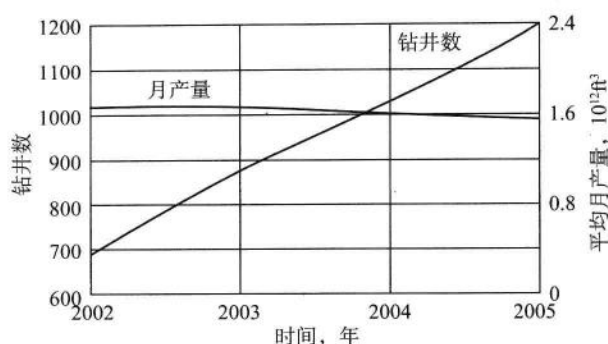


图 1-4 美国钻井数量和月产量的关系

第三节 天然气的运输

大体上，在可预见的未来，有足够的天然气储量满足全世界的需求。如果缺乏基础设施这个主要的障碍得到解决，天然气的需求量将有进一步的增加。在这一部分，我们将要探讨一些用来提高天然气运输水平的方法。

一、输气管道

天然气的主要运输方法是通过管道。为了促进和支持天然气需求增长的计划，全世界都在努力增加天然气的集输和分配能力。在过去的五六年里，每年平均完成超过 12000mile (19312km) 的天然气管道，其中大部分是跨越国界的。如果政治上能够保持稳定，那么天然气管道能够为运输问题提供一个长期的解决办法。例如，这种方法被提议运用在从阿曼到印度的深水天然气管道。但是，建造这种管道的花费尚不清楚。假如技术和经济上的问题得到解决，这些管道可以成为下面将要讨论的未来液化天然气 (LNG) 项目的有效竞争者。

二、液化天然气

过去的 30 年充分证明液化天然气技术是有效的。在 2005 年，大约 7×10^{12} ft³ (0.2×10^{12} m³) 或者 5.6% 的天然气是通过液化天然气技术运输的。到 2020 年，全世界通过液化天然气技术运输的天然气预计达到 17×10^{12} ft³ (0.49×10^{12} m³)。液化天然气从 8 个国家输出（印度尼西亚、马来西亚、阿尔及利亚、澳大利亚、文莱、阿拉伯联合酋长国、美国和利比亚）运输到 8 个国家和地区（美国、日本、韩国、中国台湾、比利时、法国、西班牙和土耳其）。美国既是液化天然气的输出国又是进口国，是因为很多在阿拉斯加州生产的天然气出口到日本；然而美国也通过他的终端进口数量庞大的天然气。在很多国家液化天然气是全部天然气需求的主要来源。例如，日本 97% 的天然气需求是通过液化天然气满足的。对于韩国也是如此，在韩国几乎所有的天然气是通过液化天然气提供。其他的亚洲国家（泰国和印度）也加入进来，他们希望在不久的将来通过液化天然气进口天然气。

虽然有成熟的技术，但是液化天然气计划仍然有重大的挑战。对于一个成功的液化天

然气计划,几个关键性的因素必须满足。首先,天然气的产生地应该具有的储量超过该地年生产能力的25~30倍。因为建造液化天然气生产工厂需要较高的初始费用,所以天然气应该相对较便宜($1 \times 10^3 \text{ft}^3$ 即 28.3m^3 的天然气0.5美元较适宜)。第二,建设液化工厂的资金储备是非常重要的。通常,建造一个具有 $100 \times 10^6 \text{ft}^3/\text{d}$ ($2.83 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$)液化能力的工厂需要2.25亿美元到6.75亿美元。第三,液化天然气通过具有双层船壳和特殊内层的油轮运输。建造 $3 \times 10^9 \text{ft}^3$ (135000m^3)容积的油轮花费2.6亿美元。另外,运输的费用随着距离的增大呈线性增加。通常每天大约消耗储液罐体积的0.15%至0.25%以保持剩余气体液化态。例如,把天然气从卡塔尔运输到日本(大约7000mile或11200km)将要消耗3.6%的天然气。第四,油轮一旦抵达目的地,只有通过特殊的终端,液化天然气才能卸下。液化工厂连同连接管道一起的费用能够达到几亿美元。除了建设液化设施每 $1 \times 10^3 \text{ft}^3/\text{d}$ ($28.3 \text{m}^3/\text{d}$)花费大约0.85美元之外,还有运转费用构成,输送天然气进入液化工厂大约0.55美元。

如上所示,液化天然气中的每个环节需要有各方长期大量的资金保证——天然气供应商、液化设备、运输公司和经销商。另外,各方也需要有充足的财力和强有力的项目管理技巧。通过协商谈判达到一个微妙的平衡,使天然气的价格保持在较低的水平,以便刺激消费,但是应有足够高的利润促使开发商实施这个方案。一个成功的液化天然气方案通常在生产上每 $1 \times 10^3 \text{ft}^3$ (28.3m^3)花费0.5美元,在液化方面每 $1 \times 10^3 \text{ft}^3$ (28.3m^3)花费2.5美元,在运输上每 $1 \times 10^3 \text{ft}^3$ (28.3m^3)花费0.75美元,再液化每 $1 \times 10^3 \text{ft}^3$ (28.3m^3)花费0.25美元。在使用国内天然气时,价格作为一个可行性的选择能够影响液化天然气的长期前景。国内生产的天然气短缺,目前液化天然气是长距离运输天然气的唯一选择。

三、天然气的液化

天然气液化技术(GTL)是指把天然气转变成合成液态烃,特别是变成中间馏分。有些人预测, $900 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($25.5 \times 10^{12} \text{m}^3$)的天然气如果远离市场,要生产或运输是有利可图的。这足以证明具有约 $200 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 液化能力的工厂是可行的。

天然气液化技术并不是新鲜事物。第一步,天然气转变成烃和一氧化碳。这种混合物叫做合成气。和天然气转变成烃的过程相同,它能够做为燃料电池的燃料。这一步的成本是最高的,大约占整个天然气液化过程的50%。第二步,在一个浆状反应中,合成气在 450°F (232°C)和催化剂的作用下变成液体,称为费托合成。这种液体能够变成其他想要的产品,例如作为裂解过程的燃料。

目前把天然气变成合成燃料的成本是每桶(0.16m^3)在14美元至22美元。这还不包括天然气作为原料的费用。如果原油的价格每桶(0.16m^3)在50美元至60美元,当天然气又能以较便宜的价格购买时,生产合成油就显得很明智。另外,合成油比原油具有一些优点:

(1) 在非洲和中东的很多国家,天然气液化技术结束了伴生气的燃烧,不再向大气中释放大量的二氧化碳。

(2) 这种合成燃料没有或者只有非常低的硫含量。因此,除了价格比较高之外,这种

燃料还是环保型燃料。

(3) 天然气液化工厂也能够为高级技术工作提供锻炼的机会。

(4) 运输费用比液化天然气低很多。

既然有这么多的有利条件存在，为什么我们仍然没有很多的天然气液化工厂？一个不利的条件是建造一个天然气液化工厂的成本太高，建造一个天然气液化工厂要花费 110 亿美元。这是非常大的投资，必须要有长期稳定的天然气供应作为保证。生产混合燃料的价格将要依赖天然气的价格，有可能使它的价格比原油价格高很多，从而使它难以销售出去。如果没有较低的价格和政府的激励，石油公司宁愿生产原油也不愿意把天然气变成合成燃料。另一个不利的方面是以目前的技术使用合成燃料最后释放出的二氧化碳比使用液化天然气还要多。例如，使用液化天然气产生 $1 \times 10^{15} \text{Btu}$ ($1.05 \times 10^{15} \text{kJ}$) 的热量将释放出 $1940 \times 10^4 \text{t}$ 的碳化物，然而，使用合成燃料将释放出 $2680 \times 10^4 \text{t}$ 的碳化物。使用合成燃料几乎多释放出 30% 的碳化物。如果在未来为了减少温室效应对碳化物的释放征税，合成燃料将变得没有吸引力。

所有的努力都致力于使这种技术更有吸引力。美国的能源部门在很多工业伙伴的支持下，致力于研发一种更好的技术产生合成燃料。这种技术建议使用一种陶瓷膜，以便把空气分离成氧气和氮气，并且在第一步中部分氧化甲烷变成一氧化碳和氢。这种新的方法生产合成燃料预计降低 25% 的成本。

即使在当前的技术条件下，也有 4 个世界级的商业工厂经营天然气液化项目。图表 1-1 简要的介绍了这些工厂。

表 1-1 世界上的天然气液化业务

公司	地址	生产能力, bbl/d (m ³ /d)
沙索 (Sasol)	南非沙索堡 (Sasolberg)	5000 (795)
沙索	南非塞康达 (Secunda)	150000 (23850)
壳牌 (Shell)	马来西亚民都鲁 (Bintulu)	12500 (1990)
莫斯天然气公司 (Mossgas)	南非莫塞尔湾 (Mossel)	30000 (4770)

(来源：雪弗龙当代网络)

表 1-1 表明商业上可行的操作在适当的情况下使用适当的技术都可以运行。随着技术的不断提高，更多的工厂将运作起来。英国石油公司 (BP) 正在运行两家试验性工厂，其中一家在阿拉斯加州，这家阿拉斯加州的工厂特别重要，因为北坡油田包含大约 $25 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($0.71 \times 10^{12} \text{m}^3$) 的天然气储量。通过天然气的液化，这里的石油管道可以用来输送液化天然气。这将延长石油管道的使用寿命，同时也能够开发其他临近的油藏。除了英国石油公司，雪佛龙公司计划在尼日利亚建造一家工厂，埃克森美孚国际公司 (ExxonMobil) 计划在普拉德霍湾 (Prudhoe) 建造一家工厂，阿拉斯加和卡塔尔沙索天然气公司计划在卡塔尔建造一家工厂。很多其他工厂正在发展阶段。天然气液化技术将成为运输液化天然气可行的选择，这是一个合理的预测。

四、天然气水合物管道

另一种外来的方法仍然在试验阶段,它把天然气变成水合物并且以一种浆状的形式运输天然气水合物。在适宜的温度和压力下天然气与水结合生成天然气水合物。它是一种笼型晶体结构,在标准状态下,1m³的水合物能够储存50m³的天然气。使液化天然气体积减少1600倍。在一个相对稳定的过程中,天然气水合物能够存在于-10~-20℃(-4~-5°F)和一个标准大气压(14.7pai)的条件下。日本钢管公司相信天然气水合物技术能够在储存和运输方面和液化天然气技术有效地竞争。

第四节 天然气的性质

天然气主要由碳氢化合物组成。甲烷是主要的成分。其他的组成包括乙烷、丙烷、丁烷以及重质复杂的烃类。除了碳氢化合物,天然气还包含其他的杂质。这些杂质包括氮气、二氧化碳、硫化氢和水蒸气。这些杂质不能增加天然气的发热量。这些杂质有的是无害的(例如氮气),而有些是有害的,例如造成腐蚀(如水蒸气和二氧化碳)或者有毒(例如二氧化硫)。

在天然气处理过程中,丁烷以上的重质碳氢化合物以液体的形式从天然气中分离,并以液体的形式出售。因此处理后天然气的主要成分是甲烷。其中的杂质也从天然气中分离出来从而提高单位体积天然气的热量同时减少腐蚀。

第五节 非常规天然气资源

有几种非常规天然气资源存在,直到几年前这些天然气的生产还被认为是不可行的。随着技术的提高,很多这些非常规的天然气资源要么变成可采的,要么被证明将来在经济上是可行的。表1-2列出了这些非常规资源。

表1-2 非常规资源

地区	煤层气		页岩气		致密地层天然气		总计	
	10 ¹² ft ³	10 ¹² m ³	10 ¹² ft ³	10 ¹² m ³	10 ¹² ft ³	10 ¹² m ³	10 ¹² ft ³	10 ¹² m ³
北美洲	3017	85	3840	109	1371	39	8228	233
拉丁美洲	39	1	2116	60	1293	37	3448	98
西欧	157	4	509	14	353	10	1019	29
苏联	3957	112	627	18	901	26	5485	155
中东	—	—	2547	72	823	23	3370	95
亚太地区	470	13	2312	65	705	20	3487	99
南亚	39	1	—	—	196	6	235	7
全世界	9051	256	16103	456	7406	210	32560	922

(来源:石油技术日报)

表 1-2 指出了非常规天然气的几个有趣的事实。第一，非常规资源量比常规资源量更大；第二，北美洲的非常规资源比世界上其他地方的非常规资源都要多。这两个事实仅仅说明北美洲工作人员更加积极地寻找非常规天然气，然而，在世界的其他地方，由于有相对比较丰富的常规资源，因此对非常规资源的需求不是很大。一旦其他国家开始寻找非常规资源，表 1-2 将发生重大变化。

一、致密砂岩中的天然气

在洛矶山山脉（也就是美国的犹他州、新墨西哥州、科罗拉多州和怀俄明州）包含大量的天然气。这些储层的典型孔隙度为 5% ~ 15%，束缚水饱和度为 40% ~ 70%，气体的渗透率为 0.001 ~ 1mD。这些地层必需包含大量的天然气才适合开采。

这种类型的储层在自然条件下不能生产。人造裂缝使生产在经济上变得可行。裂缝增加了岩石表面和井眼直接接触的面积。因此，在一定生产压差下，就可以使天然气能够在较低的渗透率下在砂岩中流动。

形成裂缝最可行的技术是大型水力压裂。这种技术包括在非常高的压力下长时间的注入水力压裂流体。这种压裂液伴随着支撑剂流入地层，例如沙子或玻璃珠。当泵停止的时候，压裂液返回井眼，把支撑剂留在地层中，保持裂缝敞开，为岩石表面和井眼之间提供一个大的接触面积。

二、致密页岩中的天然气

从致密页岩中生产天然气的州包括肯塔基州、西弗吉尼亚州、弗吉尼亚州、得克萨斯州、俄克拉荷马州和俄亥俄州。大多数的这些页岩具有 4% ~ 12% 的孔隙度和小于 1mD（有时小于 0.0001mD）的渗透率。这种页岩的面积据估计达到 20000mile²。从这种页岩中生产天然气受到天然裂缝、层理面和内空隙的控制。大型水力压裂用于提高这种页岩地层的产量。更好的压裂技术、提高的钻井速度和更高的天然气价格使这种资源具有了商业价值。

现如今，一个由页岩进行商业生产的例子是在沃思堡盆地（Fort Worth）的巴耐特页岩。巴耐特页岩气田是美国最大的天然气生产地。它已经生产了超过 $1 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($28.3 \times 10^9 \text{m}^3$) 的天然气。在 2006 年，它的产量大约是 $1 \times 10^9 \text{ft}^3/\text{d}$ ($28.3 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$)。在这个地区平均每天完成 1.5 口井。在这个地区所有新开采井都是水平多裂缝井。目的是在页岩中得到更好的连通性，连通孤立的气体。基于巴耐特页岩开发井的成功，其他的页岩也进行了类似的开发，例如在俄克拉荷马州的伍德福德（Woodford）和阿肯色州的费耶特维尔（Fayetteville）也进行了积极地开发。

三、煤层气

自从煤层开始开采，煤层中存在天然气已被大家所熟知。在碳化作用过程中，产生大量的煤层气。因为煤有很大的表面积，所以煤层能够储存数量惊人的煤层气，在相同的岩石体积下储存的天然气体积是普通储层的 6 ~ 7 倍。最初，考虑从煤层中生产天然气是出于安全方面的考虑。通过从煤层中生产天然气，消除了采矿中的火灾事故。

但是最近几年,煤层气更多的被认为是一种可能潜在天然气资源。在煤层中的天然气大部分都是甲烷。据估计仅仅在美国煤层中的天然气就在 $700 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($19.8 \times 10^{12} \text{m}^3$) 左右。它大约占美国可采天然气总量的 11.7% 或者 $141.4 \times 10^{12} \text{ft}^3$ ($4 \times 10^{12} \text{m}^3$)。在 1997 年,煤层中甲烷气的产量占年天然气产量的 5.9%。

从煤层中生产出的天然气有以下几个优点:

- (1) 甲烷存在于多数煤层中而煤炭资源的位置是已知的。见图 1-5。
- (2) 大多数位于较浅深度的煤层,容易钻井而且钻井的费用相对较低。在较深的位置,由于上覆岩层的压力,煤层中的裂缝处于关闭状态,从而降低了天然气在煤层中的流动能力。
- (3) 一旦开始生产,煤层气的产量将持续生产很多年且递减较小。

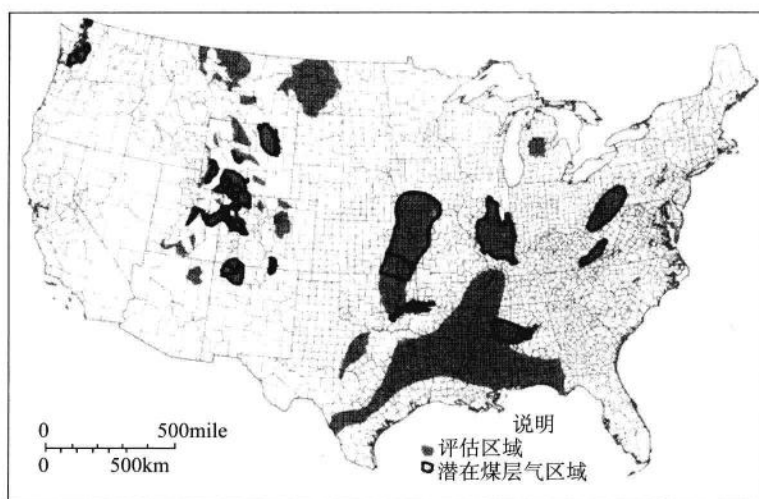


图 1-5 美国的煤田分布图

- (4) 在提高天然气产量的同时,煤层能够封存二氧化碳。

(5) 通过从煤层中开采甲烷气,阻止了在采矿过程中释放甲烷气到大气中。阻止了温室气体的排放。

从煤层中生产天然气提出了一些独特的生产方式和对环境的挑战。与天然气储层亏空不同,煤层中包含大量的束缚水。如果没有水的产出,天然气也不可能从煤层缝隙中生产出来(见图 1-6)。起初,只有水生产出来,一旦压力充分的衰竭,天然气的生产率就开始增加。这些地层水通常是含有盐的,必须在环境允许的范围内进行处理。通常,地层水又重新注入地下的岩石地层中。在某些情况下,地层水允许流入蒸发池。

有一些问题也必须解决:

- (1) 哪种类型的煤层最适合生产天然气?
- (2) 怎样最有效地从薄煤层中生产甲烷?
- (3) 处理地层水最好的方法是什么?
- (4) 煤层最佳的钻井方案是什么?