

· 新能源丛书 ·

# 煤层气

——浪子变宠儿

Coalbed Methane  
— A Prodigal Son Becomes the Darling

肖 钢 白玉湖 柳迎红 ◎ 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

• 新能源丛书 •

# 煤层气

## ——浪子变宠儿

Coalbed Methane  
— A Prodigal Son Becomes the Darling

肖 钢 白玉湖 柳迎红 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

煤层气——浪子变宠儿/肖钢,白玉湖,柳迎红编. —武汉:武汉大学出版社,2013. 11

新能源丛书

ISBN 978-7-307-11489-0

I. 煤… II. ①肖… ②白… ③柳… III. 煤层—地下气化煤气—研究—中国 IV. P618. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 184047 号

责任编辑:刘小娟

责任校对:路亚妮

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌珞珈山)

(电子邮件:whu\_publish@163.com 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:365千字

版次:2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷

ISBN 978-7-307-11489-0 定价:73.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

## ◎ 丛 书 序

---

“能源”，并不总是人们茶余饭后津津乐道的话题。说起“能源”，不少人会想到石油和国内三大石油公司的强大，还会联想到环境污染和全球气候变暖，但很少有人会想到“能源”本身，以及自己与“能源”的关系。然而，穷人类历史之长，尽人类足迹之远，仰人类文明之高，“能源”可谓与我们的生活息息相关，休戚与共，我们时时、处处都在利用它、依赖它。也正因为如此，“能源”反而更易被人们忽略，就像直到窒息时才想起原来我们是多么地依赖空气一样。日常生活中，我们不可避免使用能源，但很难挑选使用何种能源，无法影响或决定能源的来源、生产方式和价格，更无法通晓纷繁芜杂的能源技术及其发展方向。

时至今日，改变正在发生。随着资源、环境和气候问题的凸显，全球正在一步步迈入新一轮的能源变革，陈旧的能源开采、转化、利用方式正被逐渐淘汰，而新能源事业正悄然兴起，新资源、新技术、新理念层出不穷，一个崭新的时代即将到来，届时人与能源的关系都将发生改变。对于老百姓，不再是被动地接受能源，而是积极地创造，主动地分享，智能地消费。在中国，大多数人可能还无法想象很多丹麦人已经可以轻松地通过电脑软件，随时选择并任意切换不同来源、不同价格的电力供应；更无法想象不少西班牙人每天都会关注全国各地的天气预报，来估算自己在不同地方买下部分股权的太阳能电池能发多少电，并给自己带来多少利润；而美国人已经考虑在自己的车库里安装电网连接设备，用低谷电价给自己的电动汽车充电，并在用电高峰时送电上网，赚取差价……

能源问题，是全球性问题，中国亦不可避免。从某种意义上来说，经济高速增长的中国存在着更为突出的能源问题，而中国人并非后知后觉，也不会熟视无睹。几百年的落后使国人自省，30多年的改革让国人自信，对变革的必要性我们有着清醒的认知，但使我们困惑和迷茫的是怎样付诸实践，向哪些国家学习，优先发展何种能源，以怎样的力度发展，达到怎样的效果，以及能否在改革中保持和谐稳定。

曾经听过一则寓言：一只青蛙遇到了一条蜈蚣，青蛙自忖自己有四条腿，

跳跃自如，而蜈蚣却有无数条腿，竟也行走流畅。青蛙觉得很奇怪，便问蜈蚣道：“你有这么多条腿，那你行走时都是先迈哪条腿呢？”蜈蚣听了青蛙的话，不由地思考了起来。不料，蜈蚣一思考，竟从此不会走路了。原来蜈蚣从不曾执着于这个问题，只是目视前方，一心向前，自然而然就朝前走了。自从考虑先迈哪条腿后，它忘记了向前看，只盯着自己的脚，结果无数条腿互相磕绊，从此再也迈不开步子了。我想，蜈蚣不久就会明白：孰先孰后并不重要，重要的是认准方向，明确目标，一心向前。中国的能源改革同样如此，我们百般纠结于眼前的主次和先后之时，是否已经找到并确定了改革的正确方向和终极目标呢？

此套丛书介绍的是高效的能源转化技术、方兴未艾的非常规能源勘探开发技术、梯级利用的节能技术和绿色低碳的可再生能源技术。编者旨在通过此套丛书来唤起更多人对我国能源问题的思考，提升同仁们对未来能源事业的参与度和积极性。

十方来，十方去，共成十方事；万人施，万人用，同结万人缘。我诚望书中的一些知识能对有缘的读者提供小小的启发，并在此恭候各位的批评指正。



# ◎ 序 言 (一)

( 翻译稿 )

能源是人类发展过程中最重要的因素，是发展的主要资源，对人类的衣、食、住、行等方面具有决定性的影响。同时，新能源对当今世界的重要性正在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100岁了，比肖钢博士年长48岁，我们是难得的忘年交。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，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印象。我非常享受与他见面的时光，与他的每一次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，现在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十分宽广，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、做事时的巨大激情以及他独特的人格魅力让人印象深刻。肖钢博士是英国皇家化学会院士，这是化学界一个殊胜的头衔，我为有这样年轻而优秀的朋友感到自豪。

肖钢博士近日告诉我他正在为中国读者编写一套“新能源丛书”。我非常高兴能为这套丛书作序，并借此机会向所有对新能源的进步感兴趣的同仁推荐肖钢博士的作品。

哈尔杜·托普索

## 托普索先生序言原稿

Energy is the most significant factor in human growth since it is the main resource for development and it determines food, transport, industry, housing and so on. At the same time, it is widely recognized that new energy is an area of increasing importance to our world. As one of the leading companies in the catalysis industry, Haldor Topsoe company 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 100 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 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. Dr. Gang Xiao is a Fellow of the Royal Society of Chemistry (UK). This is a distinguished title in the chemistry world. I feel honored to have such a young and outstanding friend.

Dr. Gang Xiao recently told me that he is writing a set of books on new 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 new energy.



### 哈尔杜·托普索先生简介

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理念，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。

## ◎ 序 言（二）

---

当前，人类活动同自然界之间的相互影响进一步加深。面对全球温室气体排放及其引发的气候变化，有效促进资源可持续利用、环境可持续发展，努力实现人与自然的和谐，已经成为一个世界性的重大课题。这就需要我们开辟更多的途径，找到更好的办法，而优化能源结构、提高能源转化和使用效率尤其重要。

纵观当今世界，“绿色”不再是业余消遣，不再是流行口号，而是逐渐真正成为发展、建造、设计、制造、工作及生活的方式。当把环境保护等所有的成本都纳入进来时，包括非常规油气在内的新能源变成了最时尚、最有效率、成本最低的做事方式，这是世界正在经历的最伟大的转变。绿色从只是流行变得更加可用，从一种选择变成了一种必需，从一种时尚变成了必胜的战略选择，从一个无法解决的问题变成了一个巨大的机遇。

我们有理由深信：发展清洁的新能源和高效能源技术将会变成决定未来50年国家经济地位、环境健康、能源安全及国家安全的战略选择。这场清洁技术革命关系到国家强大与否。今天，我们为了走上绿色道路所做的每一件事都会使我们国家更强大、更健康、更安全、更具创新力、更有竞争力、更能受到尊重。我们在解决自身问题的同时也在帮助全世界解决问题。

从本质上来说，科技决定未来能源。在替代能源发展过程中，到底哪一种能源应该占主导地位，各种新能源应该如何布局，应该由技术论证、环境评测和市场验证来决定。对于这点，科技界提出了林林总总的方案，有些具备了产业化的条件，有些正在开发，有些处于研究阶段，还有些则属于大胆的设置。这些人类的大课题涵盖了很多的学科领域、很广的技术专业、很深的知识层面及很大的行业范围，因此很少有人以通俗易懂的方式将这些技术情况系统地展现给读者。

恰逢此时，我很高兴看到肖钢博士及其合作者正在编写一套“新能源丛书”，该丛书系统地介绍了高效能源转化技术、非常规天然气技术及可再生能源技术等诸多方面的最新进展，这对科研人员掌握国际上新能源发展现状大有裨益，也为希望了解新能源技术概况的人士提供了有用的信息。

肖钢博士是国家引进的海外高级人才，在能源领域成果丰硕。他已经出版了数本学术专著，希望他主持的这套“新能源丛书”也会受到读者喜爱。

中国工程院院士 曾恒一



### 曾恒一院士简介

曾恒一，海洋石油工程专家，中国工程院院士。主持设计、建造我国第一代海上石油钻探船、海上石油平台导管架下水大型驳船、海上浮式生产储油轮等。主持国家“863”工程的“海洋边际油气田资源开发技术”项目研究并组织编制了海上油气田总体开发方案。主持完成的科研成果“渤海五号、七号自升式钻井船”获国家科技进步二等奖。

# 前 言

煤层气是煤重要的伴生矿产资源,属非常规天然气,其应用广泛,是近几十年在国际上崛起的清洁、优质能源和化工原料。在煤层气被当作能源进行开发利用之前,其被视为煤炭开发过程中的一种潜在灾害诱因,给全球的煤炭开采带来了巨大的财产和人员损失。我们常常听说的煤矿瓦斯爆炸、煤矿瓦斯突出等都是由煤层气引起的。而且,由于煤矿开挖导致甲烷气体被大量排放至大气中,这是导致全球变暖的一个重要原因,因为甲烷气体的温室效应是同质量二氧化碳的二十多倍。近些年,在全球倡导降低温室气体排放量的大背景下,煤层气引发了人们越来越多的关注。

全球煤层气资源储量丰富,根据国际能源机构(IEA)的估计,全世界煤层气资源量可达 260 万亿立方米,其中储量最多的是俄罗斯,其次是加拿大、美国和中国。我国煤层气资源量大约为 36.8 万亿立方米,相当于常规天然气的储量。美国是世界上开发煤层气最成功的国家,至 2009 年,美国煤层气产量达到了 576 亿立方米,占全球煤层气总产量的 78%。美国煤层气开发的成功得益于技术的进步,同时也得益于其政策的扶持。受美国的影响,澳大利亚和加拿大已进入煤层气工业化开发阶段。

我国煤层气产业历经二十余年的发展,特别是在“十一五”期间国家出台的一系列优惠扶持政策的鼓励下,煤层气产业已处于商业化开发的初期阶段,已具备了快速发展的潜力。我国目前已经初步形成煤层气勘探开发的产业化,但产业化规模还很低。2011 年,我国煤层气地面抽采量仅为 23 亿立方米。目前我国已经启动沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘两个产业化基地的建设,实施煤层气开发利用高技术产业化示范工程,建成端氏—博爱、端氏—沁水等煤层气长输管线,初步实现规模化、商业化开发,形成了煤层气勘探、开发、生产、输送、销售、利用等一体化产业格局。

我国煤层气资源丰富,如果能够得到高效的开发利用,将有效地提供清洁的天然气能源,为弥补我国油气供给的巨大缺口和改善天然气生产结构作出显著贡献。赋存于地下的煤层气是造成煤矿瓦斯灾害的根源,“先采气、后采煤”以及“采煤采气一体化”,是保障煤炭这一我国主体能源的根本途径。随着我国经济继续保持平稳较快发展,工业化和城镇化进程继续加快,能源需求将持续增长。煤层气开发利用可有效增加国内能源供应量,具有广阔的发展前景。

全书分为 11 章,内容涵盖煤层气的地质特征、成藏机理、煤层气开发机理、煤层气钻完井及压裂技术。第 1 章对煤层气的定义、性质、形成、应用和煤炭关系以及国内外目前煤层气勘探开发现状进行了概述;第 2 章简要介绍了煤层气的地质特征及煤层气的成藏

机理;第3章对我国主要含煤层气盆地的勘探开发现状进行总结,包括沁水盆地、鄂尔多斯盆地、吐哈盆地、阜新盆地和准噶尔盆地等;第4章探讨了煤层气的资源评价方法和勘探选区方法;第5章主要介绍了煤层气开采机理,包括煤层气解吸/吸附机理、扩散机理、渗流机理及注气提高煤层气采收率机理;第6章对煤层气的产能评价技术进行讨论;第7章阐述了煤层气井的测试原理、工艺、流程及测试理论的最新进展;第8章介绍了煤层气数值模拟技术及多分支水平井开采的数值模拟;第9章概述了煤层气的钻井工艺技术及国内外成功的钻井工艺实践;第10章介绍了煤层气的完井技术、煤层气井压裂技术;第11章介绍了煤层气井排液采气的工艺技术、设备、设备选型及优化等。

在本书的撰写过程中,限于时间和作者能力,书中不当之处在所难免,恳请读者见谅,并批评指正。

编 者

2013年6月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>1 煤层气概述</b> .....         | 1  |
| 1.1 煤层气的定义 .....             | 3  |
| 1.2 煤层气与煤的关系 .....           | 4  |
| 1.2.1 煤炭的形成 .....            | 4  |
| 1.2.2 煤层气的形成 .....           | 5  |
| 1.3 煤层气的用途 .....             | 6  |
| 1.4 煤层气勘探开发现状 .....          | 6  |
| 1.4.1 美国煤层气勘探开发进展 .....      | 7  |
| 1.4.2 俄罗斯煤层气分布特征 .....       | 11 |
| 1.4.3 加拿大煤层气发展现状 .....       | 13 |
| 1.4.4 澳大利亚煤层气发展现状 .....      | 14 |
| 1.4.5 我国煤层气勘探开发现状 .....      | 15 |
| 1.4.6 国内外煤层气勘探开发条件类比分析 ..... | 22 |
| <b>2 煤层气地质特征及成藏理论</b> .....  | 25 |
| 2.1 煤层气地质特征 .....            | 27 |
| 2.1.1 煤储层特征 .....            | 27 |
| 2.1.2 煤层气水文地质条件 .....        | 33 |
| 2.2 煤层气成藏理论 .....            | 34 |
| 2.2.1 煤层气成藏过程 .....          | 34 |
| 2.2.2 构造作用对煤层气生成的影响 .....    | 36 |
| 2.2.3 我国煤层气富集成藏特征分析 .....    | 37 |
| <b>3 我国主要煤层气盆地</b> .....     | 41 |
| 3.1 沁水盆地煤层气简介 .....          | 43 |
| 3.1.1 沁水盆地煤层气勘探开发现状 .....    | 43 |
| 3.1.2 沁水盆地煤储层含气性特点 .....     | 47 |
| 3.1.3 沁水盆地煤层气成藏主控因素分析 .....  | 48 |
| 3.2 鄂尔多斯盆地煤层气简介 .....        | 50 |
| 3.2.1 鄂尔多斯盆地煤层气勘探开发现状 .....  | 50 |
| 3.2.2 鄂尔多斯盆地煤储层含气性特点 .....   | 54 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 3.3 吐哈盆地煤层气简介 .....           | 59        |
| 3.3.1 吐哈盆地煤层气勘探开发现状 .....     | 59        |
| 3.3.2 吐哈盆地煤层分布特征 .....        | 60        |
| 3.3.3 吐哈盆地煤储层特征 .....         | 63        |
| 3.3.4 吐哈盆地煤层含气性特点 .....       | 66        |
| 3.4 阜新盆地煤层气简介 .....           | 67        |
| 3.4.1 阜新盆地煤层气勘探开发现状 .....     | 67        |
| 3.4.2 阜新盆地煤层发育特征 .....        | 74        |
| 3.4.3 阜新盆地煤储层特征 .....         | 75        |
| 3.5 准噶尔盆地煤层气简介 .....          | 80        |
| 3.5.1 准噶尔盆地煤层气勘探开发现状 .....    | 80        |
| 3.5.2 准噶尔盆地煤层气形成条件 .....      | 81        |
| 3.5.3 准噶尔盆地煤层气资源量 .....       | 83        |
| <b>4 煤层气资源评价与勘探选区方法 .....</b> | <b>85</b> |
| 4.1 煤层气资源评价方法 .....           | 87        |
| 4.1.1 煤层气地质分析 .....           | 87        |
| 4.1.2 煤层气资源量计算方法 .....        | 87        |
| 4.1.3 煤层气综合地质评价方法 .....       | 89        |
| 4.1.4 煤层气有利区块评价流程 .....       | 89        |
| 4.1.5 煤层气综合地质评价实例 .....       | 90        |
| 4.2 煤层气勘探选区方法 .....           | 93        |
| 4.2.1 煤层气区带优选 .....           | 93        |
| 4.2.2 煤层气目标区优选 .....          | 95        |
| <b>5 煤层气开采机理 .....</b>        | <b>99</b> |
| 5.1 煤层气开采机理研究发展历程 .....       | 101       |
| 5.1.1 煤层气解吸/吸附理论国内外研究现状 ..... | 101       |
| 5.1.2 煤层气渗流机理国内外研究现状 .....    | 103       |
| 5.2 煤层气解吸/吸附基本理论及模型 .....     | 104       |
| 5.2.1 煤层气解吸/吸附的概念 .....       | 104       |
| 5.2.2 煤层气的解吸/吸附的基本理论 .....    | 105       |
| 5.2.3 煤层气的解吸过程 .....          | 105       |
| 5.2.4 煤层气的吸附过程 .....          | 106       |
| 5.2.5 单组分气体的解吸/吸附理论模型 .....   | 109       |
| 5.2.6 多组分气体的解吸/吸附理论模型 .....   | 112       |

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.7 煤层气解吸/吸附的影响因素 .....                                    | 113        |
| 5.3 煤层气的扩散过程及模型 .....                                        | 116        |
| 5.3.1 煤层气的扩散过程 .....                                         | 116        |
| 5.3.2 煤层气扩散模型 .....                                          | 116        |
| 5.4 煤层气的渗流机理 .....                                           | 120        |
| 5.4.1 煤层气的渗流特征 .....                                         | 120        |
| 5.4.2 煤层气的渗透性 .....                                          | 121        |
| 5.5 煤层气注气开采机理 .....                                          | 124        |
| 5.5.1 煤层气注气开采的基本原理 .....                                     | 124        |
| 5.5.2 单组分气体的吸附能力 .....                                       | 125        |
| 5.5.3 多元组分气体的吸附和解吸 .....                                     | 126        |
| 5.5.4 采用 $\text{CO}_2$ 或 $\text{N}_2$ 置换 $\text{CH}_4$ ..... | 126        |
| 5.5.5 注气开发的可行性 .....                                         | 127        |
| 5.5.6 注气开采带来的问题 .....                                        | 127        |
| <b>6 煤层气产能评价技术 .....</b>                                     | <b>129</b> |
| 6.1 煤层气产出特点 .....                                            | 131        |
| 6.1.1 煤层气的地下流动特征 .....                                       | 131        |
| 6.1.2 煤层气的生产阶段特征 .....                                       | 131        |
| 6.2 煤层气产能研究及预测方法 .....                                       | 133        |
| 6.2.1 数值模拟方法 .....                                           | 133        |
| 6.2.2 数理统计方法 .....                                           | 133        |
| 6.2.3 无因次产气图版法 .....                                         | 134        |
| 6.2.4 典型曲线产能预测方法 .....                                       | 136        |
| 6.3 产能影响因素研究 .....                                           | 138        |
| 6.3.1 影响煤层气单井产能的主要因素 .....                                   | 138        |
| 6.3.2 煤层气井产能影响因素理论研究 .....                                   | 140        |
| 6.4 煤层气排采工作制度 .....                                          | 145        |
| 6.4.1 排采机理 .....                                             | 145        |
| 6.4.2 煤层气排采曲线类型的划分 .....                                     | 146        |
| 6.4.3 排采参数对产量的影响 .....                                       | 147        |
| 6.4.4 煤层气排采因素分析 .....                                        | 151        |
| 6.4.5 产能模型和排采阶段模型的建立 .....                                   | 152        |
| 6.4.6 排采工艺技术 .....                                           | 154        |
| 6.4.7 地面采集设备 .....                                           | 155        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 6.5 采收率确定方法 .....         | 156 |
| 6.5.1 等温吸附曲线法 .....       | 156 |
| 6.5.2 解吸法 .....           | 159 |
| 6.5.3 类比法 .....           | 160 |
| 6.5.4 气含量降低估算法 .....      | 161 |
| 6.5.5 数值模拟法 .....         | 161 |
| 6.5.6 产量递减曲线分析法 .....     | 162 |
| 6.5.7 物质平衡法 .....         | 162 |
| 6.6 提高煤层气采收率措施研究 .....    | 162 |
| 6.6.1 煤储层压裂技术 .....       | 163 |
| 6.6.2 多分支水平井技术 .....      | 163 |
| 6.6.3 ECBM 技术 .....       | 163 |
| 6.6.4 注热开采煤层气技术 .....     | 164 |
| 6.6.5 洞穴应力释放法 .....       | 164 |
| 6.6.6 声震法提高煤层气采收率技术 ..... | 165 |
| 6.6.7 生物技术 .....          | 166 |
| 6.6.8 注水法 .....           | 166 |
| 7 煤层气测试与试井技术 .....        | 167 |
| 7.1 煤储层对试井的影响 .....       | 169 |
| 7.2 煤层气测试 .....           | 170 |
| 7.2.1 注入/压降测试技术 .....     | 170 |
| 7.2.2 钻杆(DST)测试 .....     | 174 |
| 7.2.3 段塞测试 .....          | 174 |
| 7.2.4 水罐测试 .....          | 175 |
| 7.3 煤层气测试理论的发展 .....      | 176 |
| 8 煤层气数值模拟技术 .....         | 179 |
| 8.1 煤层气数值模拟技术研究发展历程 ..... | 181 |
| 8.2 数学模型的类型及典型模型 .....    | 184 |
| 8.2.1 气体吸附-扩散模型 .....     | 184 |
| 8.2.2 非平衡吸附模型 .....       | 186 |
| 8.2.3 组分模型 .....          | 187 |
| 8.2.4 黑油模型 .....          | 188 |
| 8.3 不同类型数学模型计算结果的比较 ..... | 188 |
| 8.3.1 数学求解方法 .....        | 188 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 8.3.2 不同类型数学模型计算结果的比较 .....    | 188        |
| 8.4 多分支水平井开采数值模拟 .....         | 190        |
| 8.4.1 多分支水平井的主要优点 .....        | 190        |
| 8.4.2 影响煤层气多分支水平井产能的主控因素 ..... | 191        |
| 8.4.3 羽状水平井产能影响因素的数值模拟分析 ..... | 193        |
| 8.5 煤层气井网优化数值模拟研究 .....        | 199        |
| 8.5.1 煤层气井网布置的基本原则 .....       | 200        |
| 8.5.2 煤层气井网优化设计的内容及方法 .....    | 201        |
| 8.5.3 单井和井网对产量的影响模拟 .....      | 203        |
| 8.5.4 井网部署优化 .....             | 204        |
| 8.6 煤层气数值模拟技术的理论研究 .....       | 205        |
| <b>9 煤层气钻井工艺技术 .....</b>       | <b>207</b> |
| 9.1 煤层气钻井工艺 .....              | 209        |
| 9.1.1 煤层气直井钻井工艺 .....          | 209        |
| 9.1.2 煤层气 U 形井钻井工艺 .....       | 211        |
| 9.1.3 煤层气欠平衡钻井工艺 .....         | 211        |
| 9.1.4 煤层气地质导向工艺技术 .....        | 214        |
| 9.1.5 煤层气分支井主井眼与直井连通工艺技术 ..... | 216        |
| 9.2 井身结构设计及优化技术 .....          | 217        |
| 9.3 钻具组合及井身质量控制设计 .....        | 224        |
| 9.4 钻井液的选择及优化 .....            | 226        |
| 9.5 钻头选型及钻井参数设计 .....          | 229        |
| 9.6 钻进过程中的煤储层保护技术 .....        | 230        |
| 9.7 煤层气井的井壁稳定性研究 .....         | 231        |
| 9.8 煤层气固井技术 .....              | 233        |
| 9.9 煤层气钻井取心技术 .....            | 234        |
| 9.10 煤层气测井和录井技术要求 .....        | 235        |
| 9.10.1 煤层气测井系列选择 .....         | 235        |
| 9.10.2 测井处理及解释 .....           | 235        |
| 9.10.3 工程测井 .....              | 235        |
| 9.10.4 U 形水平井测井 .....          | 236        |
| 9.10.5 录井内容和质量保证措施 .....       | 236        |
| 9.11 煤层气井井场布置及钻机选择 .....       | 237        |
| 9.11.1 井场布置 .....              | 237        |

|        |                      |     |
|--------|----------------------|-----|
| 9.11.2 | 钻机选择                 | 238 |
| 9.11.3 | 钻机性能分析               | 242 |
| 9.12   | 国内外煤层气田钻井技术实践        | 244 |
| 9.12.1 | 山西晋城地区煤层气钻井技术        | 244 |
| 9.12.2 | 沁水盆地南部低成本煤层气钻井技术     | 245 |
| 9.12.3 | 美国煤层气的裸眼造穴工艺         | 247 |
| 10     | 煤层气完井增产工艺技术          | 249 |
| 10.1   | 煤层气井主要完井方式           | 251 |
| 10.1.1 | 国外煤层气井完井技术           | 252 |
| 10.1.2 | 国内煤层气井完井技术           | 252 |
| 10.2   | 煤层气井压裂增产技术           | 253 |
| 10.2.1 | 煤层水力压裂难点             | 254 |
| 10.2.2 | 煤层气井压裂关键技术           | 256 |
| 10.2.3 | 煤层气井裂缝识别技术           | 256 |
| 10.2.4 | 压裂施工压力预测技术           | 259 |
| 10.2.5 | 煤层气井压裂液体系优选          | 260 |
| 10.2.6 | 支撑剂优选技术              | 264 |
| 10.2.7 | 压裂优化设计及工艺优化技术        | 266 |
| 10.2.8 | CO <sub>2</sub> 压裂技术 | 271 |
| 11     | 煤层气井排液采气工艺技术         | 273 |
| 11.1   | 国内外煤层气井排采设备          | 275 |
| 11.1.1 | 国外排采设备现状             | 275 |
| 11.1.2 | 国内排采设备现状             | 276 |
| 11.2   | 煤层气井主要排采设备           | 277 |
| 11.2.1 | 煤层气井排采设备优选           | 277 |
| 11.2.2 | 煤层气主要排采设备及工艺         | 279 |
| 11.2.3 | 煤层气井排液采气工艺适应性        | 282 |
| 11.3   | 排采工作制度               | 284 |
|        | 参考文献                 | 287 |