



煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书

卷十一

宋岩 张新民 主编

○ 宋岩 张新民 柳少波 等著

# 中国煤层气地质 与开发基础理论



科学出版社  
www.sciencep.com

煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书·卷十一

宋 岩 张新民 主编

# 中国煤层气地质与开发基础理论

宋 岩 张新民 柳少波 等著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

煤层气是我国资源潜力大、开发程度低的非常规天然气资源,也是我国目前最现实的接替能源。本书针对煤层气勘探开发的难点,围绕“煤层气生成的动力学过程、煤层气储集机理及成藏响应、煤层气藏富集分布及主控因素、煤层气经济开采的基础理论”4个科学问题开展研究,主要内容包括3个方面:煤层气勘探开发现状及研究基础;煤层气地质理论与评价预测技术;煤层气开采机理与技术。本书阐述了我国煤层气成因、赋存、成藏和渗透率变化等方面的规律和机制;形成了从煤层气可采资源预测、综合地质评价到地球物理探测、开采优化设计的技术系列,并服务于煤层气开发实践,是一部理论与实践结合密切的煤层气领域专著。

本书适合煤层气研究人员和相关专业人员阅读,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国煤层气地质与开发基础理论/宋岩等著. —北京:科学出版社,2012  
(煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书 / 宋岩,张新民主编;11)  
ISBN 978-7-03-033674-3

I. ①中… II. ①宋… III. ①煤层-地下气化煤气-资源开发-研究  
IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 032536 号

责任编辑:韦 沁 胡晓春/责任校对:包志虹  
责任印制:钱玉芬/封面设计:高海英

**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>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年3月第一次印刷 印张:34 1/4

字数:791 000

**定价:98.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 序 一

国家 973 计划煤层气项目,将出版《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》(共 11 卷),内容包括煤层气基础研究现状、煤层气的生成与储集、煤层气成藏机制及富集规律、中国煤层气资源潜力、煤层气地震勘探技术、煤层气经济高效开采方法等诸多方面的基础理论及应用基础问题,涵盖面相当广泛,是一项很有意义的系统科学工程。项目首席科学家让我为该套丛书作序,欣然应命,特写以下文字,以示支持和祝贺。

煤层气是一种重要的非常规天然气资源。美国在 20 世纪 80 年代实现了对煤层气的商业性开发利用,建立起具有相当规模的煤层气产业。中国是个煤炭资源大国,煤层气资源也相当丰富。据最新预测结果,全国煤田埋深 2000m 以浅范围内,拥有的煤层气资源量为  $31 \times 10^{12} \text{m}^3$  (褐煤未包括在内),与我国陆上常规天然气资源量大致相当;若将褐煤中的煤层气也计算在内,数量则更加可观。从我国化石能源资源的禀赋条件和经济社会发展需求来看,煤层气是继煤炭、石油、天然气之后我国在新世纪最现实的接替能源;同时开发利用煤层气在解除煤矿瓦斯灾害隐患、保护大气环境方面也具有十分重要的作用。

我国从 20 世纪 80 年代开始进行现代煤层气技术研究及开发试验工作,截至 2004 年上半年,在全国境内已施工各类煤层气井近 250 口,建成柳林、潘庄、大城、淮南等 10 余个煤层气开发试验井组,其中阜新刘家、晋城潘庄、沁水柿庄 3 个井组已进行商业性煤层气生产;在煤储层特征研究、煤层气资源评价等基础研究以及无烟煤煤层气开发等方面也取得了可喜的进展。但总体上说,我国煤层气产业化进程缓慢,不能满足国民经济和社会发展的需要。

煤层气不同于常规天然气。它在地球化学特征、储集性能、成藏机制、流动机理、气井产量动态等方面与常规天然气有明显差别,必须要用不同于常规油气的理论和方法来指导煤层气的勘探与开发。同时,由于中国大陆是由几大板块经多次碰撞、拼合而成,至今仍受欧亚、印度、太平洋三大板块运动的共同作用影响;中国的聚煤期多、延续时间长,煤田遭受的后期改造次数多、作用强烈,因而铸就了中国煤层气地质条件的复杂性和多样性。因此,在北美单一大陆板块环境下产生的美国煤层气理论不完全适应中国的情况。

建立符合中国地质特征的煤层气基础理论,为形成中国煤层气产业提供科学技术支撑,是中国科技工作者面临的紧迫任务。经过各方面的共同努力,

在国家科学技术部的支持下,国家 973 计划“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目,汇集我国石油、煤炭、中国科学院和高等院校等行业和部门的专家学者及精英们协同攻关,体现了多学科交叉、产学研相结合的科学研究新理念,改变了过去部门条块分割、单一学科推进的被动局面。

项目紧紧围绕国家目标和关键科学问题,组织各方面力量,就制约我国煤层气产业化的主要科学问题,如煤层气的成因、储集性能、成藏动力学、气藏成因类型、资源富集规律及潜力、煤储层特征的地球物理响应、气体流动与产出机理等,高起点地开展了广泛、深入的基础研究,这些成果对我国煤层气产业的形成和发展具有理论指导和技术导向作用,集中代表了当前我国煤层气基础研究的整体水平。

将研究成果及时整理出版,可展示我国煤层气基础研究的实力,是加强学术交流、传播煤层气知识、加快科学研究成果向现实生产力转化的重要环节。新的科学理论和技术方法,必将加快我国煤层气产业化进程,并对世界煤层气的发展做出贡献。让我们大家共同努力,早日实现我国煤层气的跨越式发展,以满足经济社会发展对洁净能源不断增长的需求。

中国科学院院士



2004 年 8 月于北京

## 序 二

煤层气,俗称瓦斯,是以吸附态赋存于煤层中的一种自生自储式非常规天然气。开发和利用煤层气是一举两得的事,不仅可作常规油气的补充资源,更重要的是能够大大改善煤矿安全生产条件,减少以至杜绝煤矿事故发生。

煤层气作为一种资源量巨大的非常规天然气资源,已经从研究逐渐走向开发利用。美国是最早进行煤层气开发利用的国家,煤层气工业起步于20世纪70年代,到80年代实现了大规模的商业开发,煤层气的产量增长速度快,从1980年的年产不足 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ 到1990年年产 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ ,90年代初期稳产在 $200 \times 10^8 \text{m}^3$ ,2002年年产 $450 \times 10^8 \text{m}^3$ ,约占美国天然气当年产量的7.9%,可见美国煤层气的开发是相当成功的,比较成功的盆地为科罗拉多州和新墨西哥州的圣胡安盆地和亚拉巴马州的黑勇士盆地。一般认为煤层气井低产,但也有相当高产的,例如1996年,我考察圣胡安盆地ARCO公司辖区,有110口煤层气井,日产气 $660 \times 10^4 \text{m}^3$ 多。因此研究煤层气低产中的高产规律有重要的理论与实践意义。澳大利亚借鉴美国的成功经验,也开展煤层气的勘探和试验,取得一定的成效。此外,捷克、波兰、比利时、英国、俄罗斯、加拿大等国也都开展煤层气的勘探开发试验。目前,世界上对煤层气研究日益加深,开发地域日益扩大,煤层气在能源中的地位日益提高。

我国是煤炭资源大国,拥有相当丰富的煤层气资源(据“七五”估算,埋深2000m以浅的资源量为 $31 \times 10^{12} \text{m}^3$ )。我国煤层气的勘探开发明显落后于美国,从80年代开始,积极引进美国的煤层气开采技术,进行勘探开发试验,但总的来说成效不大,主要原因是我国煤层气地质条件复杂,对煤层气藏形成机理还不太清楚,煤层气的勘探和开采与常规天然气又有很大差别,缺少较为完善和成熟的理论指导。因此,在我国进行煤层气的勘探与开发基础理论研究将是推动该产业更快向前发展的前提,回顾20年前“煤成气的开发研究”国家重点科技攻关项目的进行,促进了我国目前天然气工业的大好局面就是一个实证。我曾和其他科学家一同向国家科技部呼吁过立项进行煤层气的研究,今天这一愿望终于实现,“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”正式立项实施了,这是一件可喜可贺的大事,通过该项目的研究,将会解决我国煤层气勘探与开发存在的若干重大问题,深化煤层气成藏和开采机理的认识,催生煤层气勘探大好局面早日到来。

本人有幸加入该项目的跟踪专家行列,从立项到研究启动,一直在关注着

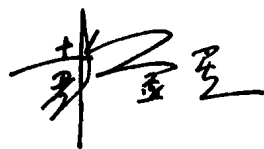


其进展和研究成果。迄今,项目前期的成果显著,不乏新发现、新认识和新观点以及创新。宋岩、张新民两位首席科学家计划在项目研究期内出版 11 卷《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》(以下简称《丛书》),《丛书》包含煤层气勘探和开发各个方面成果,主要包括前期调研论文集《煤层气成藏机制及经济开采理论基础》,和集成各个课题的和项目的研究成果。《丛书》从煤层气形成的动力学过程及资源贡献、煤储层物性非均质性及控制机理、煤层的吸附特征与储气机理、煤层气藏动力学条件研究、煤层气成藏条件和模式、我国煤层气可采资源潜力评价、煤层气藏高分辨率探测的地球物理响应、煤层气开采基础理论研究、煤层气开发技术等方面,系统全面地研究煤层气的勘探开发理论,技术、方法等诸多基础性、关键性问题,这是前人未及的一个重要举措。《丛书》总的主线是形成一套系统的、具有中国特色的煤层气勘探与开发理论,这也是我国目前所缺乏的。首席科学家所作出的努力和宗旨意在把我国煤层气研究优秀的成果充分展现给地学和煤层气领域学者,达到互相学习交流的目的。《丛书》是该领域中的知识积累、规律总结和创新结晶。这套丛书的出版将对从事煤层气工作的学者、相关专业人员和大中专院校学生大有裨益,同时,势必对煤层气产业产生重要影响和促进。

《丛书》的主编和作者主要是中青年科研骨干,项目给了他们用武之地,他们年富力强,知识广博,勤于实践,善于探索,勇于攀登,敢于创新,是一支强有力的生力军,故由他们编著的《丛书》基础扎实,知识丰富。

在此预祝《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》顺利陆续出版,并能成为煤层气理论和实践双全的文献。

中国科学院院士



2004年8月1日

## 前 言

随着国民经济的快速发展,我国对于能源的需求持续增长,油气供需矛盾日益突出。自 1993 年中国由原油净出口国转变为进口国起,随着国内需求的不断增长进口量逐年攀升。2007 年我国原油净进口  $15928 \times 10^4 \text{t}$ ,同比增长 14.7%,原油对外依存度达到 46.05%,根据预测天然气与原油一样会在近几年出现供应缺口。煤层气是我国资源潜力大、开发程度低的非常规天然气资源。全国埋深 2000m 以上煤层气总资源量为  $32.86 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,其中技术可采资源量为  $13.90 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。煤层气远景资源量与我国陆地常规天然气地质资源量大致相当。煤层气是资源规模仅次于常规天然气的洁净能源,煤层气的开发和利用对确保我国天然气工业长期快速发展具有重要的现实意义。

煤矿安全对于煤炭工业的发展十分重要,2001 年以来,随着煤层气(瓦斯)抽采量的增加,国家高度重视并投入了大量的人力财力,煤矿事故造成的死亡人数虽总体呈下降趋势,但煤矿事故和伤亡人数仍居高不下。2006 年,全国共发生煤矿事故 2945 起、死亡 4746 人,其中瓦斯事故 327 起、死亡 1319 人,分别占煤炭行业工伤事故的 11.1%和 27.8%。统计表明,我国近年来因瓦斯事故死亡的人数约占煤炭行业工伤事故死亡人数的 25%~40%,造成了巨大的经济损失。通过“先采气、后采煤”,可以建立煤层气开发与煤炭开采间的协调发展模式,最终实现煤层气产业和煤炭工业的共同发展,为国民经济和社会和谐健康发展提供重要保障。

环境保护是我国乃至全世界 21 世纪可持续发展战略的重要组成部分。我国以煤为主的一次能源消费结构造成的大气污染十分严重,导致了酸雨大面积发生以及城市空气质量日益恶化,酸雨分布面积占我国国土面积的 8.4%。煤层气的主要成分为甲烷( $\text{CH}_4$ ),而甲烷的“温室效应”是二氧化碳( $\text{CO}_2$ )的 22 倍。我国每年因采煤造成大量  $\text{CH}_4$  直接排放到大气中,较高的  $\text{CH}_4$  排放使我国面临越来越大的来自国际社会的压力。作为一种能源利用方式,燃烧同样热值的煤层气释放的  $\text{CO}_2$  要比石油少 50%,比煤炭少 75%;煤层气燃烧时所产生的污染物一般只有石油的 1/40,煤炭的 1/800。加快发展煤层气产业,快速提升天然气在国家一次能源消费结构中的比例,可以有效降低  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放,是我国改善和保护生存环境的重要途径。

基于国家能源发展的需求,2002 年科技部设立了国家重点基础研究发展计划项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”,主要解决煤层气勘探开发方面的学科问题。该项目于 2008 年 11 月结题,本书反映了项目的综合研究成果。

在基础理论研究方面,本书揭示了我国煤层气成因、赋存、成藏和渗透率变化等方面的规律和机制;系统地建立了我国煤层气地质理论体系;丰富完善了天然气地质理论;为煤层气资源评价、富集区预测和经济开采提供了理论基础:

① 系统地建立起中国煤层气成因类型划分方案与示踪指标体系,提出了次生生物气是中国煤层气的重要成因类型之一,确定了次生生物气存在的证据,揭示了次生生物气生成条件和形成机理。



② 应用吸附势理论,建立了温(度)、压(力)综合作用下煤吸附甲烷量的模型和不同煤阶煤吸附等温线的分段描述模型,揭示出煤层气成藏过程中的吸附特征,为认识煤层气成藏机理、开展煤层气资源评价及研发煤层气开发技术工艺提供了理论基础。

③ 界定了煤层气藏的概念,确定了构造、盖层和水动力条件是煤层气藏成藏的关键控制因素,提出了构造和水动力对煤层气藏的控制作用机制,为煤层气富集区预测提供了科学依据。

④ 建立了煤储层弹性能及其控藏效应的理论,指出煤层气排采过程中煤储层渗透率变化的机制为地应力增加引起裂隙闭合与煤层气解吸引起煤基质收缩的综合效应,即煤储层弹性自调节效应理论,指导了煤层气勘探有利区带优选和排采制度的制定。

在方法、技术开发方面,本书形成了涵盖煤层气可采资源预测、综合地质评价、地球物理探测和开采优化设计的技术系列,并服务于煤层气开发实践,取得了较好的效果:

① 建立了新的、基本与常规天然气和国际惯例接轨的“煤层气资源量分类系统”,提出了煤层气技术可采资源量的概念;在国内首次建立了具有很强的系统性、科学性和可操作性的煤层气技术可采资源量预测方法,为进行煤层气资源可采性定量评价奠定了基础;预测出全国煤层气技术可采资源量为  $13.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

② 建立了煤层气勘探开发区预测评价方法,结合煤层气技术可采资源量评价结果和外部条件,分别指出我国高变质煤、中变质煤、低变质煤和未变质(褐)煤煤层气勘探开发的有利区,为煤层气资源勘探开发指明了方向。

③ 开发了煤层气开发有利区地震三维三分量和 AVO 响应探测技术,在淮南煤层气实验区预测中取得了较好的效果,成果具有很大的推广价值。

④ 自主研发了煤层气储层评价、水力压裂和羽状水平井优化设计数值模拟系统,填补了国内在这一领域的空白;并应用于沁水盆地南部煤层气开发中,取得了较好的效果。

本书共 11 章,第一章主要介绍煤层气勘探开发现状及研究基础;第二章至第九章,主要阐述煤层气地质理论与评价预测技术;第十章、第十一章论述煤层气开采机理与技术。全书内容涉及从勘探到开发的基础研究成果,构成一个有机整体。

本书前言和第一章由宋岩、张新民、柳少波编写;第二章主要由陶明信、解光新等编写;第三章主要由汤达祯、王生维等编写;第四章主要由张群、桑树勋等编写;第五章主要由秦勇、侯泉林、宋岩等编写;第六章主要由宋岩、刘洪林、洪峰等编写;第七章主要由张新民、赵靖舟等编写;第八章主要由彭苏萍、霍全明等编写;第九章主要由刘洪林、张新民、秦勇、汤达祯等编写;第十章主要由胡爱梅、张遂安等编写;第十一章主要由万玉金、张士诚等编写。最终由宋岩、张新民、柳少波统稿。

本书在正式出版之际,感谢科技部对项目的重视、指导与支持;感谢中国石油天然气集团公司、中国石油天然气股份公司、煤炭科学研究总院西安研究院对项目的大力支持、帮助与关心;感谢各承担单位及相关产业部门为项目的顺利实施的支持;感谢项目专家组的各位专家长期对项目的跟踪指导。最后,在全体研究人员的共同努力下,圆满完成了项目的计划任务,达到了预期目标,有效地实践了基础研究创新并为产业部门服务的立项方针。希望借助本书的出版,能推动我国煤层气产业和煤层气应用基础研究的发展。

# 目 录

序一 .....	贾承造 (i)
序二 .....	戴金星 (iii)
前言 .....	(v)
<b>第一章 煤层气勘探开发现状及研究基础</b> .....	(1)
<b>第一节 国外煤层气产业发展状况及启示</b> .....	(1)
一、美国煤层气产业发展 .....	(1)
二、其他国家煤层气产业发展 .....	(4)
<b>第二节 中国煤层气产业发展历程及理论技术研究现状</b> .....	(5)
一、中国煤层气产业发展历程 .....	(6)
二、中国煤层气基础研究新进展 .....	(6)
三、中国煤层气勘探开发技术现状和进展 .....	(10)
<b>第三节 中国煤层气勘探开发面临的关键科学技术问题</b> .....	(12)
<b>第二章 煤层气的成因类型及判识标准</b> .....	(14)
<b>第一节 煤层气的地球化学特征及其与天然气的差异性</b> .....	(14)
一、样品测试方法 .....	(14)
二、煤层气的组分构成与基本特征 .....	(14)
三、煤层气的同位素组成与分布范围 .....	(15)
四、煤层气与常规天然气同位素组成的差异及其特殊性 .....	(16)
<b>第二节 影响煤层气甲烷碳同位素指标的主要因素</b> .....	(18)
一、煤层气甲烷碳同位素的解吸分馏作用 .....	(18)
二、次生生物气的生成对煤层甲烷碳同位素组成的影响 .....	(20)
三、煤岩显微组分的含量变化对煤层甲烷碳同位素组成的影响 .....	(22)
<b>第三节 煤层气成因类型划分和地球化学示踪指标体系</b> .....	(22)
一、原生生物成因煤层气 .....	(23)
二、热降解煤层气 .....	(24)
三、热裂解煤层气 .....	(27)
四、次生生物成因煤层气 .....	(29)
五、混合成因煤层气 .....	(32)
六、煤层气成因类型的示踪指标体系 .....	(37)
<b>第四节 次生生物气的特征与形成机制</b> .....	(37)
一、次生生物气的特征 .....	(38)
二、煤岩有机地球化学与微生物降解特征 .....	(38)
<b>第三章 煤层气有利储层表征及控制因素</b> .....	(54)
<b>第一节 煤储层储集空间特征</b> .....	(54)

一、煤储层孔隙系统 .....	(54)
二、煤储层裂隙系统 .....	(61)
第二节 有利煤储层表征与数学模型 .....	(66)
一、煤储层孔隙系统模型 .....	(66)
二、煤层气储层非均质性模型 .....	(78)
第三节 有利煤储层成因机理与控制因素 .....	(82)
一、有利煤储层沉积成岩控制作用 .....	(82)
二、煤化作用过程孔渗性变化 .....	(92)
三、煤储层构造应力应变响应 .....	(96)
四、盆地演化对煤储层物性的控制作用 .....	(106)
<b>第四章 地层条件下煤的吸附特征与吸附模型</b> .....	(111)
第一节 温度、压力综合影响下煤吸附特征的实验研究 .....	(112)
一、等温吸附实验研究 .....	(112)
二、变温变压吸附实验研究 .....	(113)
第二节 地层条件下煤的吸附特征 .....	(116)
一、温度对煤吸附能力的影响 .....	(116)
二、温度和压力综合影响下煤的吸附性能 .....	(117)
三、地层条件下煤吸附能力变化的机理解释 .....	(122)
第三节 地层条件下煤吸附模型 .....	(122)
一、煤对甲烷的吸附特征曲线 .....	(122)
二、高压等温吸附实验特征曲线及对 $k$ 值的修正 .....	(124)
三、建立吸附模型 .....	(127)
第四节 模型检验及应用 .....	(128)
一、用不同温度等温吸附试验结果检验模型 .....	(128)
二、变温变压实验结果与模型 .....	(130)
三、沁水盆地不同埋深、煤变质条件综合影响下的煤吸附量 .....	(131)
四、科学及应用价值 .....	(137)
<b>第五章 煤层气成藏动力学条件与聚散机制</b> .....	(139)
第一节 煤层气成藏的构造动力条件 .....	(139)
一、盆地构造演化奠定了煤层气成藏基础条件 .....	(139)
二、盆内构造分异导致煤层气成藏构造动力条件复杂化 .....	(141)
三、构造动力对煤储层的改造控制了煤层气高渗区段分布格局 .....	(145)
四、构造动力条件组合控制了煤层气成藏分布基本格局 .....	(149)
第二节 煤层气成藏热动力条件与聚散历史 .....	(149)
一、石炭系一二叠系煤层受热历史 .....	(149)
二、燕山中期构造热事件及其热动力来源 .....	(152)
三、煤层气聚散历史数值模拟 .....	(154)
四、热动力条件对煤层气成藏效应的控制作用 .....	(162)
第三节 地下水动力系统与煤层气聚集关系及其机制 .....	(163)

一、水文地质单元边界及其内部构造差异性与煤层气聚散特征	(163)
二、地下水动力条件分区带与煤层含气性特征	(167)
三、地下水地球化学场与煤层气保存条件	(170)
四、地下水水头高度与煤层含气性特征	(174)
五、地下水动力条件控气效应及其显现形式	(177)
六、水动力条件与煤层气富集区的关系	(179)
第四节 煤层气成藏动力条件耦合控藏效应	(183)
一、地质动力条件耦合控藏效应分析思路	(183)
二、表象动力条件叠合控藏作用	(184)
三、煤层气能量动态平衡系统及其地质演化过程	(188)
四、煤层气成藏效应与聚散模式	(195)
<b>第六章 煤层气藏形成与分布</b>	(211)
第一节 煤层气藏的含义与类型	(211)
一、煤层气藏含义	(211)
二、煤层气藏与常规天然气藏的差异性对比	(211)
三、煤层气藏的边界及类型	(212)
四、煤层气藏类型	(217)
第二节 中高煤阶煤层气成藏过程及成藏机制	(220)
一、煤层气成藏研究的理论基础	(220)
二、典型煤层气藏成藏机理分析	(225)
三、不同地质背景下煤层气成藏成藏模式	(248)
第三节 高低煤阶煤层气成藏机理对比及成藏有利条件分析	(251)
一、高低煤阶煤层气藏形成的气源条件对比	(251)
二、高低煤阶煤层气藏形成的储集条件对比	(255)
三、高、低煤阶煤层气藏形成的赋存特征对比	(259)
四、高、低煤阶煤层气成藏过程对比	(262)
五、高、低煤阶煤层气藏水文地质条件对比	(265)
第四节 煤层气富集控制因素及分布规律	(273)
一、构造控藏及关键时刻	(273)
二、煤层顶、底板及上覆地层有效厚度控藏	(277)
三、向斜富集理论	(281)
<b>第七章 煤层气技术可采资源评价及预测</b>	(286)
第一节 煤层气资源量分类系统	(286)
第二节 煤层气技术可采资源预测方法	(288)
一、煤层气可采性影响因素分析	(288)
二、煤层气重要参数确定方法	(292)
三、煤层气技术可采资源量预测方法	(307)
第三节 中国煤层气技术可采资源潜力分析	(313)
一、中国煤层气富集单元划分	(313)

二、中国煤层气技术可采资源量预测成果 .....	(324)
三、中国煤层气技术可采资源分布特征 .....	(334)
<b>第八章 煤层气有利区的地震预测技术</b> .....	(338)
<b>第一节 煤层气赋存的主要地质属性分析及预测</b> .....	(338)
一、煤层埋深的地震探测 .....	(338)
二、煤层厚度的地震反演 .....	(338)
三、利用地震多属性分析技术反演煤层顶板岩性 .....	(340)
四、煤层含气性分布预测的地震波形分类技术 .....	(346)
<b>第二节 煤层裂隙的多波地震响应及预测</b> .....	(349)
一、煤层中直立裂隙的多波地震响应 .....	(349)
二、煤层中直立裂隙的多波地震探测 .....	(351)
<b>第三节 AVO 反演及煤层气富集区预测</b> .....	(365)
一、AVO 理论的动力学依据 .....	(365)
二、使用 AVO 探测煤层气的依据 .....	(366)
三、控制煤层气富集的主要地质参数的 AVO 响应 .....	(367)
四、煤层气富集区的 AVO 响应 .....	(369)
五、煤层气富集区的三参数 AVO 方法 .....	(372)
六、煤层气富集区的三参数 AVO 预测 .....	(374)
<b>第九章 煤层气开发地质条件综合评价</b> .....	(377)
<b>第一节 中国煤层气资源开发有利区选择</b> .....	(377)
一、中国煤层气资源概况 .....	(377)
二、煤层气开发有利区综合评价与优选 .....	(381)
<b>第二节 重点盆地煤层气富气带(目标区)的评价与优选</b> .....	(384)
一、选区评价方法、参数体系与评价标准 .....	(384)
二、重点含煤盆地煤层气富气带(目标区)评价 .....	(406)
<b>第十章 煤层气开采过程中解吸-渗流机理与开发方式优选</b> .....	(414)
<b>第一节 煤岩在多相介质中的弹性力学性质</b> .....	(414)
一、多相介质煤岩体的三轴力学实验 .....	(414)
二、实验原理 .....	(416)
三、多介质煤岩体三轴力学特征 .....	(417)
四、体积压缩系数和体积模量 .....	(420)
<b>第二节 开采过程中煤储层渗透性变化规律</b> .....	(421)
一、煤岩渗透率测试 .....	(421)
二、煤层变形介质自调节效应模型 .....	(427)
<b>第三节 开采过程中煤层气的解吸-渗流机理</b> .....	(430)
一、煤层气产出特征分析 .....	(430)
二、煤层气解吸动力学特征及解吸行为研究 .....	(432)
三、多孔煤介质中煤层气渗流机理研究 .....	(439)
<b>第四节 典型煤层气藏开发方式优选</b> .....	(446)

一、不同开发方式煤层气生产动态分析 .....	(446)
二、开发方案对比 .....	(451)
<b>第十一章 煤层气增产机理及应用效果</b> .....	(454)
<b>第一节 水力压裂增产机理</b> .....	(454)
一、水力压裂增产机理实验研究 .....	(454)
二、水力压裂井压裂裂缝展布特征 .....	(470)
三、水力压裂裂缝展布模型 .....	(475)
四、提高水力压裂效果的措施和技术优选 .....	(488)
<b>第二节 多分支水平井开采增产机理</b> .....	(492)
一、煤层气多分支水平井开采的数学模型和数值模型 .....	(492)
二、煤层气多分支水平井增产机理研究 .....	(506)
三、煤层气多分支水平井的应用条件及经济性分析 .....	(514)
<b>第三节 应用实例及其效果分析</b> .....	(516)
一、压裂井的现场实施及压裂效果分析 .....	(516)
二、多分支水平井的现场实施及效果分析 .....	(521)
<b>结束语</b> .....	(523)
<b>参考文献</b> .....	(525)



# 第一章 煤层气勘探开发现状及研究基础

开发利用煤层气对缓解常规油气供应紧张状况、改善煤矿安全生产条件、实施国民经济可持续发展战略、保护大气环境等多方面均具有十分重要的意义。煤层气开发最早在美国取得成功,近年来在澳大利亚和加拿大发展迅速。我国煤层气开发早期开始于对煤矿瓦斯的排放,近十年来在沁水盆地南部、阜新盆地等地区成功地进行了商业性开发,并在全国含煤盆地进行了大面积的勘探工作。

## 第一节 国外煤层气产业发展状况及启示

全世界估计煤层气资源量为  $2980 \times 10^{12} \sim 9609 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  ( $85 \times 10^{12} \sim 265 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )。美国圣胡安盆地水果地煤层气富集区带的发现激起了 20 世纪 80 年代和 90 年代初的世界性勘探浪潮。尽管这个勘探浪潮未能发现比得上水果地煤层气富集区带的煤层气田,但是在此期间,在美国开展了许多具经济意义的(即使是小型的)煤层气项目,且世界范围内的勘查仍在继续。在澳大利亚昆士兰州的鲍恩(Bowen)盆地开展了商业性煤层气项目,在其他盆地还有试验性项目;其他国家,包括加拿大、英国、中国、哥伦比亚和印度,煤层气勘探或试验项目也在持续不断地进行,加拿大于 2002 年宣称有商品煤层气销售,近年发展十分迅速。

### 一、美国煤层气产业发展

目前,美国煤层气产业无论在技术水平还是在产业化方面均居世界首位,因此美国煤层气产业的发展现状代表了国外煤层气勘探、开发的程度。

美国本土 14 个含煤盆地中,1200m 以上深度内煤层气地质储量达到  $11.3 \times 10^{12} \sim 24 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,这些煤层气主要分布于 16 个含煤盆地中。在美国东部地区,商业性开采少量煤层气已有 70 多年历史。实际上,早在 1943 年,Price 和 Headlee 就极为详细地描述了商业性煤层气产业的潜力。美国西部的煤层气开采大约开始于 40 年前的圣胡安(San Juan)盆地。在美国东部和西部,早期都是在测试失败或更深地层枯竭以后,偶然地以浅层煤层作为目的层完井的;大多数井的产量都很不起眼,因为当时很少或根本没有对气层采取增产措施。

在美国,健全的煤层气产业发展的前 20 年是由下列技术和非技术问题决定的:① 美国矿业局要求在地下采煤以前要先进行脱气以防爆炸;② 20 世纪 70 年代欧佩克(OPEC)的石油禁运导致联邦政府颁布措施(1980 年原油意外利润税收法第二十九款)以鼓励开发非常规天然气资源;③ 美国能源部、天然气研究所(即现在的天然气技术研究所,GTI)及其他单位在公共部门研究和技术方面的进展;④ 作业公司,尤其是阿莫科公

司(即现在的英国石油-阿莫科公司, BP-Amoco)的研究。由于这些研究和实验方案的实施,煤层气勘探真正开始于20世纪70年代晚期,历史上有名的阿莫科 1Cahn 井于1977年在圣胡安盆地开钻;在1977年,USX公司和美国矿业局共同在布莱克沃里尔(Black Warrior)盆地的奥克格罗夫(Oak Grove)煤田开始了垂直井煤层脱气工程项目,并取得成功;80年代中期至晚期,美国有好几个盆地进行勘探,并确定在圣胡安和布莱克沃里尔两个盆地进行开发。

20世纪80年代,随着裸眼洞穴完井技术和空气钻井技术的发展和运用,美国圣胡安盆地和布莱克沃里尔盆地率先实现大规模的商业性开发,从此诞生了美国煤层气工业。90年代后,随钻取心、层内水平井、定向羽状水平井和复合完井等钻井完井技术的研究和试验,美国煤层气工业得到了空前的大发展。

美国本土生产的天然气占美国天然气总消耗量的85%,其余天然气依靠从加拿大进口。为了解决能源短缺的问题,煤层气的勘探和开发越来越受到重视,煤层气在天然气中所占有的比例近年来增长很快。2001年美国的能源供应有24%来自于天然气,而煤层气在美国本土生产的天然气中所占的比例达8%;2002年煤层气产量达到 $450 \times 10^8 \text{m}^3$ ,相当于当年中国常规天然气的总产量( $440 \times 10^8 \text{m}^3$ );2007年美国煤层气产量达 $540 \times 10^8 \text{m}^3$ ,钻井多达32000口(图1.1)。

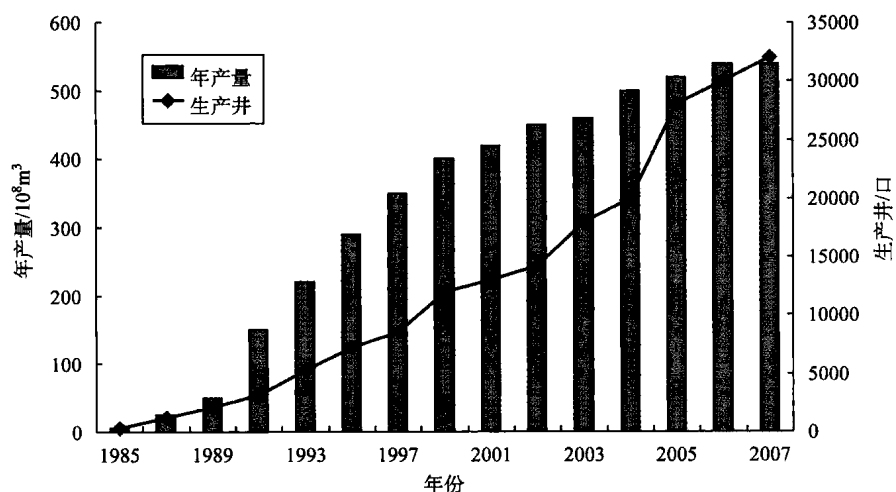


图 1.1 美国煤层气产量增长图(据美国能源部,2007年)

以下重点介绍圣胡安盆地、布莱克沃里尔盆地以及粉河盆地煤层气开发技术现状。

圣胡安盆地位于科罗拉多州南部、新墨西哥州北部,属落基山脉南部的盆地,面积 $1.94 \times 10^4 \text{km}^2$ ,为一不对称向斜盆地。该盆地的煤层气井的深度一般在167.6~1219m,主力煤层的厚度从6.1m到超过12.2m;煤层气单井日产量可达到 $22653 \text{m}^3$ ,产量主要来自水果地组地层,水果地组下面的砂岩中也含有煤成气,这样有些井就在这两个组岩层中开采。

圣胡安盆地的第一口煤层气井投产于1953年,采用普通裸眼完井,产量 $0.2 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ,后期稳定在 $0.54 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ,保持了近40年。直到1977年第一个煤层气

田——锡达尔气田的投入开采,在此之前没有人注意到煤层气开发的潜力。目前,该盆地已形成 19 个开发区,共钻煤层气井 4000 多口,其中生产井 3036 口。盆地内,采用  $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的单井产气量等值线可以圈定出面积约为  $777 \text{ km}^2$ 、煤层气探明储量  $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$  的高产富集区。截至 2004 年初,该盆地已产出  $2831.7 \times 10^8 \text{ m}^3$  煤层甲烷气(水果地组煤层气原地资源量估计为  $14158 \times 10^8 \text{ m}^3$ )。该盆地煤层气井基本都是直井,选用清水或水基钻井液。区域 I 主要采用裸眼洞穴循环完井,其他区域主要实施套管井射孔完井、水力压裂增产措施。压裂液用量介于  $208.2 \text{ m}^3$  和  $1135.7 \text{ m}^3$  之间,支撑剂用量介于  $100000 \text{ lb}^{\text{①}}$  和  $120000 \text{ lb}$  之间,裂缝长度超过  $121.9 \text{ m}$ ,缝高不到  $45.7 \text{ m}$ 。尽管在开采过程中存在许多困难,但圣胡安盆地的地质条件和主体技术决定了其成功的开采。

布莱克沃里尔盆地为一较为平缓的倾斜构造盆地,含煤面积大约为  $6950 \text{ km}^2$ 。盆地东西长大约为  $370 \text{ km}$ ,南北长  $302.5 \text{ km}$ ;埋深  $240 \sim 1220 \text{ m}$ ,煤层厚度  $6 \sim 12 \text{ m}$ ,单层厚度不超过  $1.3 \text{ m}$ ,多被砂岩岩层分隔;为高挥发分烟煤至低挥发分烟煤,煤层含气量  $6 \sim 20 \text{ m}^3/\text{t}$ ,平均为  $16 \text{ m}^3/\text{t}$ ,煤层气资源量为  $5663 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1996 年在该盆地共钻井 2786 口,平均单井产量为  $3000 \sim 6000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,整个盆地钻了 6000 口煤层气井,截至 2002 年,累积产气量  $396.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,3474 口井仍在生产,日产气  $9.34 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。该盆地煤层气井的完井方式有 3 种:① 在矿井开采范围内钻井,通常称作“采动区井”;② 水平井;③ 垂直井。98% 的煤层气井均为直井,钻井液为水基钻井液,或空气循环介质。一次作业压裂液用量  $113.6 \sim 757 \text{ m}^3$ ,泵速为  $210 \sim 2100 \text{ gal}^{\text{②}}/\text{min}$ ,注入压力为  $3.45 \sim 15.9 \text{ MPa}$ 。盆地 75% 的煤层气井都选用交联凝胶压裂液,破胶剂常用硼酸盐、硫酸盐或酶破胶剂;支撑剂通常选用阿拉巴马砂,一次作业用量为  $10000 \sim 120000 \text{ lb}$ ,支撑缝宽为  $1.27 \text{ cm}$  至近乎闭合,取决于其与井筒的距离以及支撑剂在裂缝中的铺置效率。

目前布莱克沃里尔盆地主要通过以下手段来提高产量:① 在已有气田中拟钻加密井,井距以  $550 \text{ m} \times 550 \text{ m}$  为主;② 通过改进钻井、完井及压裂工艺技术,降低开发费用、提高作业效率,这些改进包括多煤层重新完井(recompletion)、提高注入量、在多个煤层同时实施水力压裂增产措施等。

粉河盆地位于蒙大拿州东南部和怀俄明州东北部,面积约为  $6.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,为一大型沉积盆地。盆地是一个较大的非对称向斜,长轴呈南东-北西向。煤系为古新统,生产区有 75% 位于怀俄明州,盆地的 50% 被认为具有煤层气生产潜力。粉河盆地煤层大多为亚烟煤,煤层甲烷气属生物成因,相对其他煤盆地而言,其单位体积的煤层气含量较低,约为  $0.8 \sim 1.13 \text{ m}^3/\text{t}$  (其他煤盆地含量一般是  $9.9 \text{ m}^3/\text{t}$ )。粉河盆地之所以形成商业开采的规模,在于其渗透率高、煤层厚、产出水质好,这些因素弥补了含气量低这一劣势。

粉河盆地工业性煤层气开发始于 1986 年。煤层气井采用裸眼完井和水力压裂技术,旨在提高气井产量。但由于该盆地煤层渗透率较高,煤层脱水后,埋藏较浅的亚烟煤层坍塌,水力压裂的增产效果并不好,因此大多数主要采用裸眼完井。粉河盆地煤层气井的井距一般为  $400 \text{ m} \times 400 \text{ m} \sim 550 \text{ m} \times 550 \text{ m}$ 。开发初期,气井数量较少,1989 年仅有 18 口井;1999 年发展到了 1683 口井,年产量为  $21.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;到 2002 年底,井数增至 10717 口,

① lb 为磅,  $1 \text{ lb} = 0.453592 \text{ kg}$ 。

② gal 为加仑,  $1 \text{ gal}(\text{UK}) = 4.54609 \text{ L}$ ,  $1 \text{ gal}(\text{US}) = 3.78543 \text{ L}$ 。