



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.science.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)
第一节 国外煤层气产业发展状况及启示 .....	(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)
第二节 中国煤层气产业发展历程及理论技术研究现状 .....	(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)
第三节 中国煤层气勘探开发面临的关键科学技术问题 .....	(12)
<b>第二章 煤层气的成因类型及判别标准</b> .....	(14)
第一节 煤层气的地球化学特征及其与天然气的差异性 .....	(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)
第二节 影响煤层气甲烷碳同位素指标的主要因素 .....	(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)
第三节 煤层气成因类型划分和地球化学示踪指标体系 .....	(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)
第四节 次生生物气的特征与形成机制 .....	(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)
第一节 煤储层储集空间特征 .....	(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—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分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>	<b>(211)</b>
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>	<b>(286)</b>
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)。

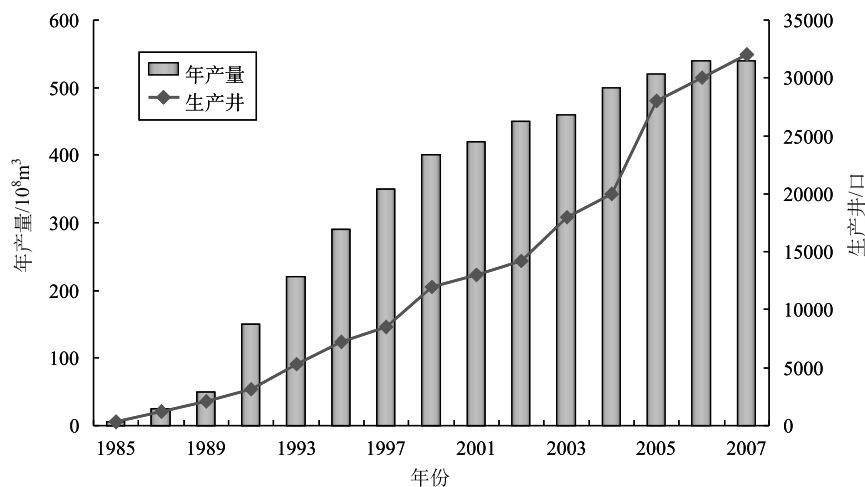


图 1.1 美国煤层气产量增长图(据美国能源部,2007年)

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

年产量为  $89.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前粉河盆地已成为美国煤层气开发的主要地区。截至 2004 年 2 月,粉河盆地在怀俄明州共有 12155 口生产井,由于没有水处理装置,有 3966 口煤层气井关井。日产煤层气量为  $0.246 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,日产水量为  $228002 \text{ m}^3$ ;平均每口井日产气量为  $2025 \text{ m}^3$ ,日产水量为  $1.287 \text{ m}^3$ 。

美国经过多年的研究和开发实践,形成了关于煤层气勘探开发的系统理论和技术,排水采气技术、煤层气增产技术(包括压裂、造洞穴和羽状水平井、注入  $\text{CO}_2$  等专项技术)、煤层气藏数值模拟技术被作为当前世界煤层气工业的三大“共性技术”,成为煤层气勘探开发的基础和支柱。同时,美国根据自身煤田地质特点发展了针对中阶煤的“选区评价理论”和“产能模式”。

## 二、其他国家煤层气产业发展

加拿大的煤层气资源总量大约为  $6 \times 10^{12} \sim 76 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中艾伯塔(Alberta)省约为  $11 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。加拿大煤层气开发的起步时间比较晚,基本与我国开展煤层气工作的时间相当。2001 年以前,全加拿大煤层气井数大约为 70 口,产量为 0;2001 年,煤层气井数增加到 100 口,单井产量取得了突破;2002 年,由 EnCana 和 MG V 合作建立了加拿大第一个商业性的煤层气项目,从此,加拿大的煤层气勘探开发进入一个快速发展的时期;2005 年,煤层气垂直井数达到 6000 口,产量突破  $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,约占天然气总产量的 1.8%。2007 年加拿大煤层气产量达到  $103 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,累计钻井 16000 口(见图 1.2)。

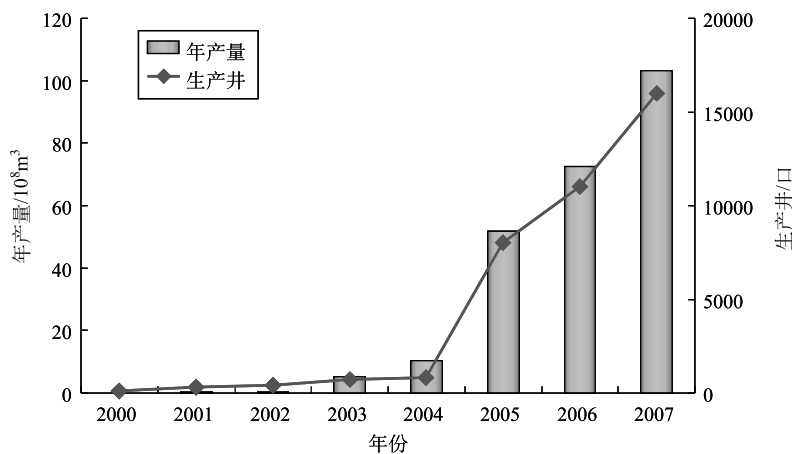


图 1.2 加拿大煤层气产量增长图(据加拿大非常规油气协会,2008 年)

在煤层气水平井钻井方面,加拿大也取得显著的进展。CDX-Canada 公司 2004 年 4 月在 Mannville 煤层成功完钻了加拿大第一口单分支煤层气水平井,水平段长度 1000m,从钻井到井口设备安装的成本大约为 150 万加元,单井日产量大约  $7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。至 2005 年 10 月,CDX-Canada 在 Mannville 煤层共完成了 5 口这样的水平井(水平分支长度最大 1200m),艾伯塔省共完成了 75 口这样的水平井,其中,Trident 公司完成了 50 口。Trident 公司已宣布于 2005 年 11 月建立了 Mannville 煤层的第一个煤层气商业性项目。

澳大利亚早在 1976 年就开始开采煤层气,主要在昆士兰的鲍恩盆地。1987 年到 1988 年期间已经用地面钻井方法在煤层中采出了煤层气。1996 年以来,澳大利亚的煤层气产量逐年增长,2000~2001 年仅昆士兰的鲍恩盆地用于煤层气勘探的费用就达 4440 万美元,占该盆地全部 1.2 亿美元勘探费的 37%。2004 年,澳大利亚新增煤层气井 277 口,煤层气产量达到  $13.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中 78% 产自昆士兰州,满足了该州 31% 的天然气需求,显示出持续增长的势头。澳大利亚煤层气开发的快速发展同样得益于一些政策上的鼓励和引导,例如,政府要求煤层中的瓦斯含量必须降到  $3 \text{ m}^3/\text{t}$  以下煤炭才能进行开采,保证了“先采气后采煤”的实施,促进了煤层气钻井数的大量增加;在昆士兰州,政府要求天然气发电必须占本州总发电量的 13%,这项政策导致了天然气需求量的大幅度增长和煤层气勘探开发投资的大规模增加。

英国、波兰、独联体国家的矿井瓦斯抽放和利用已有多年历史,抽放的瓦斯主要用作锅炉燃气或供给建在矿区的煤层气电站,少量民用。目前,这些国家正积极开发和应用煤层气发电新技术,这些国家的煤层气地面开发仅在近几年才刚刚开始。在英国,1996 年由英国煤层气公司作业的 Airth 煤层气田开始投入生产,将所生产的煤层气用于发电。直到最近,英国政府才认识到在能源工业中应该增加煤层气的比例,进而开始鼓励煤层气的开采,准备发放更多的煤层气开采许可证;并通过解除不合适的法规对煤层气操作所造成的负担,努力支持刚刚起步的煤层气产业。英国政府还按照《企业投资管理办法》给予开采煤层气的企业一定的税收优惠政策,投资者的投资可以通过减免所得税或资本红利税而得以回收。波兰政府给予从事石油、天然气以及煤层气勘探的企业 10 年免税,吸引了大量国内外投资者。目前俄罗斯和乌克兰正在制订一些税收优惠政策和管理法规,鼓励外国公司投资开发本国的煤层气资源。

印度蕴藏有丰富的煤层气资源,其中 Gujarat 盆地的褐煤中的煤层气资源量大约有  $3164 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前,印度政府已在 Gondwanas 煤系的煤盆地划出了 7 个区块用于煤层气的勘探与开发,其中在 Taniganj 和 Jhjarja 两个煤田的煤层气勘探进展较快。第一口煤层气井由印度国家石油公司在 Jhjarja 煤田钻探成功,单井煤层气日产量达  $5000 \sim 6000 \text{ m}^3$ ,最高日产量可达  $10000 \text{ m}^3$ 。同样,Bokaro 煤田的煤层气勘探成果显示单井煤层气日产量可达  $5000 \sim 6000 \text{ m}^3$ 。值得注意的是,印度煤层气的潜在生产区都远离天然气的生产区,而且也远离煤矿的采煤区,既有利于煤层气的市场开发,也不影响煤矿的生产作业。但是,印度的煤层气产业也刚刚起步,外商在印度投资开发煤层气仍面临着煤层气项目的经济性等方面的挑战,除了印度煤层气地质方面的特点外,政府的政策支持和煤层气所能达到的市场销售价格是决定煤层气项目成功的关键因素。这些政策包括:① 煤层气项目从商业性生产开始 7 年之内免税;② 实行低税率的矿区使用费;③ 对煤层气作业必需的材料和服务免交进口关税;④ 煤层气实行市场定价原则;⑤ 将煤层气依据“石油和天然气法”纳入天然气的定义和管理范畴,从法律上扩展天然气的定义,为煤层气产业的发展提供法律的保证。

## 第二节 中国煤层气产业发展历程及理论技术研究现状

我国煤层气勘探开发和利用,从初始的以煤炭安全为目的的井下瓦斯抽放逐渐发展

到近年的井下瓦斯抽放和煤层气地面井组开发并重的态势。

## 一、中国煤层气产业发展历程

从勘探开发技术发展的角度,我国煤层气主要经历了 3 个发展阶段。

### (1) 矿井瓦斯抽放发展阶段(1952~1988 年)

1952 年我国在抚顺矿务局龙凤矿建立起瓦斯抽放站,此后至 1989 年以前我国煤层气勘探开发主要处于矿井瓦斯抽放发展阶段,主要进行井下瓦斯抽放及利用、煤的吸附性能和煤层气含量测定工作。这期间的工作成果为后来全国煤层气资源预测和有利区块选择等积累了重要的实际资料。

### (2) 现代煤层气技术引进阶段(1989~1995 年)

1989~1995 年为我国现代煤层气技术引进阶段。能源部于 1989 年 9 月邀请美国有关煤层气专家来华介绍情况,并于 1989 年 11 月在沈阳市召开了我国第一次煤层气会议——“能源部开发煤层气研讨会”。随后,国家“八五”攻关课题和地方企业、全球环境基金(GEF)资助设立了多个煤层气的研究项目,并在河北大城、山西柳林进行了煤层气地面勘探开发试验,1991 年出版了我国第一部煤层气学术专著——《中国的煤层甲烷》。同时,许多外国公司也纷纷出资在我国进行煤层气风险勘探。在这段时间内,我国引进了煤层气专用测试设备和应用软件,设备的引进和人员交流使我国在煤层气资源评价、储层测试技术、开采技术等方面取得了较大的发展。

### (3) 煤层气产业逐渐形成发展阶段(1996 年至今)

为了加快我国煤层气开发,国务院于 1996 年初批准成立了中联煤层气有限责任公司;“九五”和“十五”国家科技攻关都设立了煤层气研究和试验项目,同期国家计划委员会设立了“中国煤层气资源评价”国家一类地质勘查项目;为了推进煤层气的产业化进程,2002 年国家 973 计划设立了“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目,从基础及应用基础理论的层面对制约我国煤层气发展的关键科学问题进行系统研究,并将其成果应用于煤层气的勘探开发中。

近年来我国煤层气产业发展较快,全国至 2007 年底,已施工地面煤层气钻井 2000 余口,先后分别在山西沁水、河东、两淮、六盘水、宁武、大宁吉县、陕西韩城、云南恩洪老厂、阜新、沈北、江西萍乐丰城、湖南冷水江等几十个区块进行了钻探或井组试采试验,累计探明煤层气地质储量  $1359 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,建成约  $15 \times 10^8 \text{ m}^3$  的地面煤层气产能。

## 二、中国煤层气基础研究新进展

煤层气地质作为一个新的研究领域,国外起步较早,而在我国只有近 20 年的发展历史(宋岩等,2005)。近年来,经过卓有成效的研究工作,我国在沁水盆地、鄂尔多斯盆地等地采气试验取得突破(张新民等,1991;李明潮等,1996;赵庆波等,1999;叶建平等,1999)。

这些突破给我国煤层气基础研究创造了较好的条件,国家 973 计划煤层气项目在此基础上,在一些方面均取得了创新性的成果,这些成果基本代表了我国煤层气研究的最新进展。

### 1. 煤层气成因类型及其判识

与常规天然气成因研究一样,煤层气成因的研究往往建立在地球化学方法对气体来源的判识基础上(戴金星等,1986; Rice,1993; Scott, 1993; Scott *et al.*, 1994; Smith and Pallasser, 1996)。煤层气起源于两类原始成因,即生物成因和热成因(秦勇,2003),生物成因煤层气又可分为泥炭至软褐煤阶段的原生物成因气和在烟煤中形成的次生物成因气。然而,部分地区煤层气碳稳定同位素组成显示出不同成因煤层气的叠合。

王彦龙等、张小军等(2004)通过煤层气组分、碳同位素及氢同位素研究,对我国山西沁水盆地、云南洪恩地区和淮南新集的煤层气成因进行了厘定,其中,首次系统大量的氢同位素分析为煤层气成因类型的确定提供了充分的依据,并建立了相应的地球化学判识指标(张小军等,1999)。研究表明,沁水盆地南部煤层气属热裂解煤层气,沁水盆地西北部的山西霍州煤田李雅庄煤矿煤层气具有次生生物气的地球化学特征;淮南新集地区煤层气成因类型为次生生物气为主的混合型煤层气,煤层气由次生微生物成因甲烷、热成因甲烷、大气源氮气( $N_2$ )和残留的  $CO_2$ 、重烃组成。

### 2. 煤储层特征及储层评价

煤储层特性包括裂隙-孔隙特性、吸附性、含气性、渗透性及煤储层压力等,是煤层气地质研究的一个重要方面。传统对煤储层的认识建立在以干燥煤样为基准的基础之上,提出了煤的 Langmuir 体积“三段式”的演化模式;我国研究者通过煤在平衡水条件下的吸附特性及其演化规律的研究,发现了“两段式”演化模式(叶建平等,1999;张群等,1999;傅雪海等,2002)。煤层气地质研究的另一个重要方面是煤储层裂隙-孔隙系统的非线性特征及其分维描述。国内外一直将煤储层看成是由裂隙-孔隙组成的“双重孔隙”结构系统(Close,1993),某些研究者也曾尝试采用分形理论和方法对其进行描述(何学秋,1995;赵爱红等,1998)。傅雪海提出了煤储层是由宏观裂隙、显微裂隙、孔隙共同组成的三元裂隙-孔隙介质,并建立起煤储层三元裂隙-孔隙系统的分形数学模型和分类方案(傅雪海等,2001)。

针对煤储层研究存在的问题及近年来的研究热点,国家 973 计划煤层气项目进行了大量的工作。首先,进行了高煤级煤储层参数厘定并提出煤储层评价方法;提出了压汞实验、低温氮吸附、单相渗透率测定是便于实施、容易对比的储层物性参数获取方法;提炼和优化了煤储层物性的描述参数,选择孔隙度、孔喉平均直径、比表面积、渗透率和储层压力梯度 5 个参数构建了煤储层物性评价指标体系(刘大锰,2004)。其次,以沁水盆地为例,提出了高煤级煤储层孔隙系统的地质模型和相应的分形数学模型,分析了各模型的储层物性贡献;针对我国高煤级煤储层的低渗透性特征开展煤储层大裂隙系统研究,提出了不同煤级的低渗透性煤储层大裂隙系统发育特征也不同;通过研究提出了热演化作用、沉积成岩作用和构造应力应变等是造成煤储层非均质性的主要原因(王生维,2004)。

### 3. 煤层气成藏动力场研究

“九五”以来,我国在构造应力场、热力场、水动力场等煤层气成藏控制因素方面开展

了广泛的工作,取得了一些成果(张胜利等,1997;王明明等,1998;杨起、汤达祯,2000)。

构造从宏观上控制了煤盆地形成和演化的大地构造背景,从盆地的角度看,构造应力场特征和内部应力分布不均一是导致煤储层和封盖层的产状、结构、物性、裂隙发育状况及地下水径流条件差异性的重要原因,进而影响到煤储层的含气性和可采性。在热动力学条件控制下的生气特征研究方面,研究人员认识到控制我国东部晚古生代煤层气富集的古热场具有“多期多热源叠加”的特征(叶建平,2001),可结合特定地区煤化作用和生气特征,将热动力条件与煤层气生成保存条件之间的关系分为不同的类型。相对于煤层气地质研究的其他方向,我国在煤层气成藏的水动力条件方面前期研究较为薄弱;但近年来,在水文地质条件区域控气作用、控藏作用、数值模拟和评价理论等方面都取得显著进展(骆祖江、杨锡禄,1997;骆祖江、叶建平,2001;叶建平,2002)。

水化学场对煤层气成藏过程的影响近年来受到重视,国家 973 计划煤层气项目组秦勇等通过物理模拟并结合对钻孔抽水试验、煤层气试井等资料,提出甲烷溶解度随压力增加而呈对数形式增大;甲烷溶解度随矿化度的增加而呈指数形式降低,矿化度增高,不同埋藏深度(压力)条件下煤层水的甲烷溶解度趋同。

煤层气成藏动力场的研究过去主要强调了单因素作用的研究以及规律的总结,对于控气机理及不同因素耦合的研究较少。秦勇等通过对我国沁水盆地的研究,提出了利用耦合构造应力场特性、构造变形特征以及煤储层镜质组光性组构特征来研究煤层气成藏构造动力条件的新思路;通过模拟实验,针对煤储层天然裂隙开合程度的变化提出了煤基块弹性自调节综合效应;并且发现,在煤级恒定的情况下,随着煤储层孔隙、裂隙流体压力增大综合效应呈逐渐降低的趋势;在流体压力恒定的条件下,随着煤级增高煤基块弹性自调节综合效应逐渐降低;并利用综合效应对沁水盆地煤层气成藏动力学条件有利地区进行了预测(方爱民等,2003;傅雪海等,2003,2004;Fu *et al.*, 2004; Jiang *et al.*, 2004; Sun *et al.*, 2004; Wei *et al.*, 2004;姜波、琚宜文,2004)。

#### 4. 煤层气成藏过程分析

煤层气藏在储集机理、成藏过程、气藏边界、流体状态等方面不同于常规气藏(宋岩等,2005),煤层气成藏过程、成藏模式等方面的研究一直是我国很多研究者关心的煤层气研究领域之一。鉴于煤层气藏的非常规性,许多学者在煤层气地质研究中也试图对煤层气藏赋予一定含义(钱凯等,1997;张新民等,2002),但普遍认为煤层气藏不仅难以给出确切的定义,而且在地质空间上也难以界定,所以煤层气藏的定义及边界的研究一直是煤层气研究中悬而未决的问题。煤层气藏的封闭条件可以分为水压和气压封闭两种类型,以此为基础,很多研究者结合赋气构造特征划分出不同的气藏类型,但目前为止煤层气藏类型划分还没有一个统一的方案,而且对于煤层气藏的成藏过程的研究往往侧重于地球化学方法,综合分析较少。

近两年来,通过国家 973 计划煤层气项目的研究,宋岩等在地温梯度、埋藏史研究的基础上,探讨了沁水盆地煤层气藏的成藏过程和聚气历史;通过对沁水盆地南部阳城地区和西部霍州地区的煤层热演化史、煤层气地化特征和聚气历史的对比研究,提出了现今沁水盆地煤层气藏的形成取决于决定现今煤层含气量的“关键地质时刻”,即煤层上覆“有效厚度”(地史上煤层埋藏最小的厚度)形成时期;通过正演和反演相结合的方式探讨了“关

键地质时刻”的温、压条件,并计算了成藏演化过程中含气量的变化。苏现波等根据国内外相关资料,提出了煤层气藏的4种边界类型:断层边界、水动力边界、物性边界和风氧化带边界,并进行了边界作用机理的探讨,对我国目前发现最大的煤层气藏——沁水盆地南部煤层气藏的边界进行了划分和厘定(Su,2004,2005)。

## 5. 吸附作用和解吸作用机理的研究

在吸附作用研究中,Langmuir等温吸附模型和方程长期占统治地位,国外20世纪70年代、国内20世纪90年代开始考虑煤内表面的非均匀性,尝试用势差理论模型、DR方程、GF方程以及LF方程描述煤的吸附特征。对于多组分吸附特征的研究,虽然开始于20世纪60年代末,但主要是20世纪90年代以后由于勘探开发的需要, $N_2$ 、 $CO_2$ 等其他气体以及不同组分的混合气体的吸附作用才越来越受到重视(Schroeder *et al.*, 2002; Ozdemir *et al.*, 2003)。研究表明,煤层对气体的吸附具有以下规律:随煤级增加,煤对各种气体吸附能力增大;任意一种煤对不同单组分气体的吸附能力都有显著差异,总体表现是 $CO_2 > CH_4 > N_2$ 。

针对较高的温度、压力条件及多组分的吸附作用下,地层水对煤层气吸附作用影响的研究相对较少。崔永君等通过模拟实验取得了较大的进展:对 $CH_4 + N_2$ 、 $CH_4 + CO_2$ 混合气的吸附试验表明,不同煤对相同混合气体的吸附特征有很大差异,同一煤样对不同混合气体的吸附特征也不同;总吸附量介于强吸附质和弱吸附质之间时,强吸附质的比例越高吸附量越大。

在以前的研究工作中,一般在研究压力和温度对煤吸附性能影响时,是对这两个因素分开进行讨论的。国家973计划煤层气项目组的张群等根据温度和吸附量的线性关系,讨论了压力和温度综合影响下煤吸附性能的变化规律,得出在较低温度和压力区,压力对煤吸附量的影响大于温度的影响,随着温度和压力的增加,煤吸附甲烷量增大;在较高温度和压力区,温度对煤吸附能力的影响大于压力的影响,煤吸附甲烷量减少等结论。同时,研究工作还通过物理模拟实验进一步揭示了气-液-固三相作用条件下煤层气吸附参数的变化特征。

解吸作用是与吸附作用相反的过程,在煤层气开发中解吸作用的研究十分重要。与吸附作用研究相比,解吸作用的研究相对薄弱一些。近年来随着国内煤层气的开发及研究的深入,煤层气解吸作用研究也取得了一些新的认识。张遂安等通过对不同样品不同单组分气体( $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $N_2$ )和不同配比的多组分混合气体的等温吸附、解吸实验模拟实验,提出煤层气具有吸附、解吸过程的可逆性和解吸过程的滞后性;同时进行了煤层气变形双重介质煤层气广义流动分析,建立了变形双重介质煤层气拟稳态和非稳态渗流模型。

## 6. 煤层气资源评价

煤层气资源评价是一个长期延续的基础性工作,自20世纪80年代以来很多人进行了全国或地区性的煤层气的资源评价。迄今为止,全国系统性的煤层气资源评价共产生了4个煤层气资源量:“七五”和“八五”期间由煤炭科学研究总院西安分院等计算得出煤层气资源量分别为 $30 \times 10^{12} \sim 35 \times 10^{12} m^3$ 和 $32.68 \times 10^{12} m^3$ ;1995~1998年中国煤田地质总局计算的资源量为 $14.34 \times 10^{12} m^3$ ;国家计划委员会1997~1999年设立的项目,由

中联煤层气有限责任公司和煤炭科学研究总院西安分院计算的资源量为  $31.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

在这些资源评价中主要存在的问题是:对煤层气的可采性没有引起重视,没有得到相应的可采资源量;资源数据的应用及与国外数据的对比受到限制;褐煤中的煤层气资源被忽略。

基于这些问题,张新民、赵靖舟等在对国内外多种油气资源分类进行了系统对比分析的基础上,提出了新的煤层气资源系列的划分方案(林大杨、陈春琳,2004;张新民等,2005),并提出了煤层气技术可采资源量的概念;针对煤层气资源评价的特殊性,首次提出了针对不同的煤层气勘探开发程度的两种煤层气技术可采资源评价方法,即煤层气藏数值模拟法和损失分析法,并在沁水盆地和阜新盆地取得了初步的应用效果,使煤层气资源量计算方法和结果不仅可以与常规油气资源进行对比,也可与国际上的煤层气资源量具有可比性;此外,在计算方法研究中突出了煤层气可采性研究,其结果对煤层气的勘探开发更具实际价值。

### 三、中国煤层气勘探开发技术现状和进展

由于煤层气是以吸附状态赋存于地下煤层之中,且煤储层又是一种低渗透、变形孔隙介质,给煤层气藏的识别和开采带来了较高的难度。近年来,国内外加强对煤层气勘探和开发的技术攻关,例如,煤层气地球物理勘探技术、煤层气钻井技术、煤层气完井技术、煤层气增产工艺技术等;特别是对于我国高变质无烟煤煤层气的开采技术,通过多年的攻关已取得了实质性进展。

#### 1. 煤层气地球物理勘探技术

地球物理资料在煤层气勘探中的作用主要表现在下列方面:利用测井资料确定煤层厚度和埋藏深度;利用测井资料与气体含量(无水无灰基)资料相结合确定煤层气含量;利用地震资料确定煤层的构造发育程度;利用多波多分量、AVO 资料确定煤层的裂缝发育情况。近年来,国内在利用地震勘探技术进行煤层及煤层气勘探方面取得较大的进展,彭苏萍等在淮南煤田开展了三维三分量地震勘探,初步建立了煤层厚度、裂缝发育和煤层气富集的预测方法;并按照地震属性反演的对象将地震属性反演分为 4 个层次进行,即纵波叠后反演、纵波叠前反演、方位 AVO 反演和多波联合反演。纵波叠后主要反演与纵波速度有关的岩性参数;纵波叠前反演以 AVO 为主要手段(包括方位 AVO),主要反演与含气性有关的参数;方位 AVO 反演用于预测裂隙和非均质性方面的岩性信息;多波联合反演以探测裂隙方向密度、压力、流体性质为主,同时在纵波反演的基础上更精确的厘定岩石物性参数。

地下裂隙的存在导致地震波场呈现方位各向异性的特征,地震波反射振幅随炮检距和方位角的变换而变化。在弱各向异性假设下,随炮检距和方位角变化的纵波反射系数可以简明地表示为裂隙参数的解析函数。为了利用地震波反射振幅与炮检距和方位角的变化规律预测地下裂隙分布情况,通过对淮南煤田全方位三维地震资料的精细分析和处理,主力煤层附近的地震波场呈现明显的方位各向异性特征,反射振幅随方位角的变换规



律与方位各向异性理论预测结果吻合良好,表明纵波方位 AVO 理论可以用于该煤田裂隙方位和裂隙密度的预测。

## 2. 煤层气钻井完井技术

地面煤层气井主要有垂直井和水平井两种,钻井工艺方式也有所不同。对于压力低的煤层一般采用旋转或冲击钻钻井,用空气、泡沫做循环介质,由于煤层压力低、孔渗低、易污染,用欠平衡方式钻进对地层伤害小;对于压力较高的煤层一般采用常规旋转。煤层气完井方式有 5 种:裸眼完井、套管完井、裸眼或套管混合完井、裸眼洞穴完井和水平排空衬管完井。

除了常规煤层气钻井技术,目前美国开发出定向羽状水平井新技术,其单井日产气  $3.4 \times 10^4 \sim 5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 5 年采出程度达到 85%。定向羽状水平井开采技术的优点包括:增加有效供给范围,提高了导流能力;对煤层的伤害减少;单井产量高,采出程度高;井场占地面积小,环境影响小,地面集输设施少;经济效益好。中国石油勘探开发研究院廊坊分院经过两年多的煤层气定向羽状水平井的基础研究,提出了我国第一口煤层气定向羽状水平井设计方案;通过数值模拟及增产机理研究,认识到地层压力下降是以整个羽状水平井为“源”向外逐步扩散的,从平面上看,整个水平井筒可看作地层压力下降的“源”,几乎整个煤层区域同时得到动用,使煤层的开采潜力得到了充分的发挥;特别是对中国高变质、低渗透无烟煤煤层气的开采,定向羽状水平井技术更为有效。

## 3. 煤层气增产工艺技术

### (1) 煤层气水力压裂增产技术

煤层气开采最常用的增产措施是水力压裂。但是由于我国含煤地层一般都经历了成煤后的强烈构造运动,煤层的原始结构往往遭到很大破坏,塑性大大增强,导致水力压裂时,往往既不能进一步扩展原有的裂隙和节理,也不能产生新的较长的水力裂缝,而主要是发生煤层塑性形变,总的来看效果并不理想。因此,对煤层水力压裂裂缝展布规律的认识对于提高压裂效果至关重要。

针对这一问题,张士诚等在对国内煤层气水力压裂井进行统计分析的同时,进行了煤样三轴力学性质试验、静动态试验和煤岩的水力压裂裂缝启裂实验,得到了沁水盆地煤岩杨氏模量、泊松比、体积压缩系数、颗粒压缩系数、孔隙弹性系数以及抗张强度等力学参数,并对煤岩裂缝展布规律有了新的认识。低围压时,煤岩的天然割理多在开启状态,有很强的渗流能力,裂缝会沿天然裂缝的方向发展;高围压时,煤岩的天然割理多在处于关闭状态,水力裂缝的发展向垂直于最小主应力方向接近;煤层不同于常规砂岩气藏储层,煤层的天然裂缝(割理)发育,加之煤层弹性模量小、泊松比大,所以煤层的裂缝扩张极其复杂,呈现大量的不规则性裂缝。研究人员在上述工作和认识的基础上,建立了煤岩水力压裂的数学模型(单学军等,2005)。

中国石油煤层气项目经理部在煤层气勘探开发实践中建立了煤层水力压裂裂缝诊断测试方法:利用井温测试近井地带裂缝高度和位置;利用地面电位测试裂缝的方位和长度;利用压后试井测试裂缝的长度和导流能力;利用井间地震“CT”法判断水力压裂裂缝

延伸方向和高度。中联煤层气有限责任公司还采用放射性同位素及煤层破裂微地震检测方法测试裂缝的高度、方位和长度(李安启,2002)。

## (2) 注气增产法

注气增产法是美国 Amoco 公司开发的一项提高煤层气产量的新方法。该方法被认为是一种具有发展前途的新措施,受到各方面的广泛关注。注气增产法是将  $N_2$ 、 $CO_2$  或烟道气注入煤层,降低甲烷在煤层中的分压,有利于甲烷从煤体中置换解吸出来,提高单井产量和采收率。该工艺可以有效地提高煤层气的生产潜力,而且还可以利用该工艺开发深部低渗透性煤层中的煤层气。因为注入  $CO_2$  有助于维持孔隙压力,可以较好地保护深部煤层中的割理和其他孔隙的开启程度。为了探索注  $CO_2$  提高煤层气采收率的技术,中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司在加拿大专家的协作下,进行了单井注入、单井产出的注  $CO_2$  采气试验。该试验选取山西沁水盆地南部枣园井组的 TL-003 井作为试验井,经注入、关井(使  $CO_2$  充分地置换甲烷)、排采和气体组分监测,实现了单井注入、产出试验,取得了预期成果。

## 第三节 中国煤层气勘探开发面临的关键科学技术问题

中国煤层气勘探开发面临的关键科学技术问题主要包括四个方面。

### (1) 煤层气基础研究需要进一步加强

国内外针对煤层气的基础研究还较薄弱,很多方面需要加强和深化,主要包括以下几个方面:煤储层发育地质环境及形成机理的研究和针对煤储层的评价体系的建立;高温高压条件下煤的吸附特征及描述模型、煤吸附性能的地质控制因素研究;开采过程中煤层的孔、渗变化,多重变形介质中不稳定渗流机理以及煤层气在多重变形介质中多相耦合条件下的解吸-渗流数学模型的研究;不同动力场的耦合作用、水化学作用对煤层气成藏过程的影响,成藏过程的数值模拟的研究;包括褐煤中的煤层气在内的新的煤层气资源量和可采资源量的计算与评价。

### (2) 煤层气勘探区块和目标严重不足

我国含煤盆地众多,构造演化历史较长,煤层气地质条件复杂。一般煤炭系统井浅,石油系统井深,煤层气有利目标埋深介于两者之间,且多为资料空白区。因此,针对煤层气的勘探程度还很低、对煤层气成藏条件和分布规律研究还不够深入、高产富集区预测不准、有利目标区带和区块准备严重不足。利用基础研究取得区块资料、利用目标评价方法对含煤盆地开展选区评价以及为煤层气勘探提供更多有利的勘探目标是今后的重要任务。

### (3) 勘探开发工艺技术与国外存在差距

煤层气的勘探开发需要特殊技术和装备,目前我国煤层气生产在这些方面技术尚不完善,需要引进和开发先进的生产工艺技术,主要包括以下几方面:定向羽状水平井技术、

沿倾斜的煤层内钻井增产技术、低成本空气钻井技术、洞穴完井技术、高效水力压裂技术、煤层气藏数值模拟技术等。

#### (4) 对煤层气井采出水的处理还没有建立起完备的方法体系

由于煤层气开采要排出大量的水,采出水的处理是必须面对的问题。美国已确立了一系列的方法和措施,如离子交换、化学处理、反渗透、人造湿地等。我国煤层气勘探起步较晚,煤层气开采过程中水处理还没有建立起完善的方法体系。随着国民经济的发展、国家对环境保护要求的严格及国民环保意识的提高,煤层气采出水处理将会像美国等发达国家一样成为煤层气开发的一个重要环节。亟待发展的技术包括煤层气采出水的直接利用、采出水的物理和化学处理以及采出水向地层深部回注技术等。

## 第二章 煤层气的成因类型及判识标准

### 第一节 煤层气的地球化学特征及其与天然气的差异性

在煤层气资源产业化需求的带动下,煤层气成为一个新兴的、全球性的热点研究领域,国内外在煤层气地质及地球化学研究方面均取得了一系列新的成果与进展。煤层气地球化学研究是整个煤层气研究体系和气体地球化学中的一个新的重要分支领域,这不仅因为煤层气是其研究与开发利用的直接对象,而且因为其地球化学组成特征还包含了丰富的有关煤层气成因、形成条件、保存程度、后期运移散失及开发利用价值等信息,在丰富气体地球化学研究方面也具有重要的科学意义和应用价值。

#### 一、样品测试方法

本书中测试与研究的各类煤层气样品的碳同位素用 MAT-252 稳定同位素质谱计及 Delta Plus XP 稳定同位素质谱计分析,采用 PDB 国际标准,精度为 $\leq \pm 0.25\%$ ;氢同位素用 Delta Plus XP 稳定同位素质谱计分析,采用 SMOW 国际标准,分析精度为 $\leq \pm 1.5\%$ ;气体组分测试用 MAT-271 微量气体质谱计。测试工作在中国科学院气体地球化学重点实验室完成。煤岩  $R^o$  值及煤岩显微组分主要在煤炭科学研究总院西安研究院测试完成。

#### 二、煤层气的组分构成与基本特征

煤层气的组分资料非常多,难以统计,但一般均主要由  $\text{CH}_4$  构成,其次为  $\text{C}_2+$  (重烃)、 $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$ 。陶明信(2005)等对中国部分地区煤层气的测试结果表明,除主要组分外,煤层气还含有微量组分 Ar、 $\text{H}_2$ 、He、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$  及 CO 等。例如,经过对山西晋城寺河煤矿煤样解吸气样品进行测试分析,其  $\text{CH}_4$  含量为 85.53%~99.85%, $\text{N}_2$  占 4.63%~30.87%,其次还有含量不等的  $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{CO}_2$ 、Ar、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$  及 He 等组分。

张新民等(2002)收集了我国不同地质时代和各种煤级的 358 个井田(矿)的各种煤层气样品的组分资料,共约 6000 余组数据。统计表明,煤层气组分构成以  $\text{CH}_4$  为主,其含量变化范围为 66.55%~99.98%,一般为 85%~93%; $\text{CO}_2$  含量为 0~35.58%,一般 $<2\%$ ; $\text{N}_2$  的含量变化很大,但一般 $<10\%$ ;重烃气含量随煤级不同而变化。

据 Scott 等(1995)对美国煤层气井的 985 个气样的分析结果,煤层气的组分及其平均含量为  $\text{CH}_4$  占 93.2%, $\text{C}_2+$  (重烃)占 2.6%, $\text{CO}_2$  占 3.1%, $\text{N}_2$  占 1.1%。

由于热演化和散失程度等多方面的差异,不同地区乃至同一地区不同样品的各种组分含量及组分构成一般均有一定的差异或变化。此外,个别煤田或部分地段的煤层中聚

集的气体以  $\text{CO}_2$  或  $\text{N}_2$  为主,如波兰的下西利西亚煤田、中国的窑街煤田等。其中窑街煤田煤层中突出气体的组分含量为  $\text{CO}_2$  占 95.4%~96%, $\text{CH}_4$  占 0.138%, $\text{N}_2$  占 1.99%, $\text{Ar}$  占 0.33%, $\text{H}_2$  占 0.005%, $\text{CO}$  占 0.0065%, $\text{O}_2$  占 1.24%, $\text{He}$  占 0.0041% (陶明信等,1994)。但此类高浓度  $\text{CO}_2$  多不是正常煤化过程中形成的,一般具有特殊的成因或来源 (陶明信等,1991,1992),可视为广义的煤层气。

综合以上资料,煤层气的主要成分为  $\text{CH}_4$ ,其次为  $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{C}_{2+}$  (重烃)。尽管绝大部分文献报道中缺少  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}$  等组分资料,但这并不说明绝大部分煤层气不含这些组分,今后需要加强微量气体组分的测试与研究。

### 三、煤层气的同位素组成与分布范围

从煤层气被作为新的资源进行研究以来,煤层气同位素地球化学方面 1993 年以前较重要的文献仅有十余篇,其中包括我国学者戴金星等对煤层气甲烷碳同位素的研究成果,Rice (1993)曾对这些文献资料进行了汇总分析。这些成果以甲烷的碳同位素研究为主,煤层气  $\delta^3\text{C}_1$  值的分布范围为  $-80\text{‰} \sim -16.8\text{‰}$  (PDB,下同);部分文献涉及乙烷 ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )和  $\text{CO}_2$  的碳同位素及甲烷的氢同位素组成,其中  $\delta^3\text{C}_2$  值为  $-32.9\text{‰} \sim -22.8\text{‰}$ , $\text{CO}_2$  的  $\delta^3\text{C}$  值为  $-26\text{‰} \sim +18.6\text{‰}$ , $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值的分布范围为  $-333\text{‰} \sim -117\text{‰}$  (SMOW,下同)。近十余年来,又报道了一批煤层气地球化学方面的研究成果,代表性的文献如 Smith 等(1996)对澳大利亚悉尼盆地和鲍恩盆地二叠系煤层气的研究,其中 307 个气样的  $\delta^3\text{C}_1$  值的分布范围为  $-78.9\text{‰} \sim -18.0\text{‰}$ , $\text{CO}_2$  的  $\delta^3\text{C}$  值为  $-15.5\text{‰} \sim +16.7\text{‰}$ ;88 个气样的  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值的分布范围为  $-255\text{‰} \sim -152\text{‰}$ ,平均值为  $-217\text{‰}$ ;44 个煤样的  $\delta\text{D}$  值为  $-93\text{‰} \sim -162\text{‰}$ ,平均值为  $-132\text{‰}$ 。Kotarba (2001)对波兰 Upper Silesian 盆地和 Lublin 盆地的煤层气进行了研究,其  $\delta^3\text{C}_1$  值为  $-67.3\text{‰} \sim -52.5\text{‰}$ , $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值为  $-201\text{‰}$ 。Hakan 等(2002)报道的土耳其黑海西部 Zonguldak 盆地石炭系 13 个煤层气样的  $\delta^3\text{C}_1$  值为  $-51.1\text{‰} \sim -48.3\text{‰}$ , $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值为  $-190\text{‰} \sim -178\text{‰}$ ;其中部分样品的  $\delta^3\text{C}_2$  值为  $-37.9\text{‰} \sim -25.3\text{‰}$ , $\delta^3\text{C}_3$  值为  $-26.0\text{‰} \sim -19.2\text{‰}$ , $\text{CO}_2$  的  $\delta^3\text{C}$  值为  $-29.4\text{‰} \sim -13.2\text{‰}$ 。Aravena 等(2003)研究了加拿大西南部 Elk Valley 煤田的水溶煤层甲烷。经测试,水溶煤层甲烷的  $\delta^3\text{C}$  值为  $-65.4\text{‰} \sim -51.8\text{‰}$ , $\delta\text{D}$  值为  $-415\text{‰} \sim -303\text{‰}$ ,与地下水的氢同位素 ( $\delta\text{D}$  值为  $-163\text{‰} \sim -148\text{‰}$ )亏损有关。德国 Ruhr 盆地上石炭统煤层气的  $\delta^3\text{C}_1$  值为  $-57.3\text{‰} \sim -40.0\text{‰}$ , $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值为  $-201\text{‰} \sim -175\text{‰}$ ;另外一个样品的  $\delta^3\text{C}_1$  值为  $-85.9\text{‰} \sim -85.1\text{‰}$ , $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值为  $-260\text{‰} \sim -257\text{‰}$  (Thielemann *et al.*, 2004)。

20 世纪 80 年代中期,我国学者结合国家煤成气(也称煤型气)攻关项目工作,对煤层气( $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}_2$ )中的碳同位素组成进行了研究。如戴金星等(1986)对采自 8 个省区的 42 个煤层气样进行了测试与研究, $\delta^3\text{C}_1$  值的分布范围为  $-66.9\text{‰} \sim -24.9\text{‰}$ ;唐修义等(1988)对开滦、淮南等煤田煤层气的甲烷碳同位素进行了研究, $\delta^3\text{C}_1$  值的分布范围为  $-30.1\text{‰} \sim -73.1\text{‰}$ 。通过研究中国新集地区煤层气的地球化学组成特征,其  $\delta^3\text{C}_1$  值为  $-61.3\text{‰} \sim -50.7\text{‰}$ ,平均值为  $-56.6\text{‰}$ ;  $\delta^3\text{C}_2$  值为  $-26.7\text{‰} \sim -15.9\text{‰}$ , $\delta^3\text{C}_3$  值为  $-25.3\text{‰} \sim -10.8\text{‰}$ ;  $\delta^3\text{C}_{\text{CO}_2}$  值为  $-39.0\text{‰} \sim -6.0\text{‰}$ ,平均值为  $-17.9\text{‰}$ ;  $\delta^5\text{N}$  值为

$-1\text{‰} \sim +1\text{‰}$ ;  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值为  $(1.13 \sim 3.20) \times 10^{-7}$ ,  $R/R_a$  为  $0.08 \sim 0.23$ 。

在对我国部分地区煤层气甲烷碳同位素测试结果的基础上,结合有关地区煤层气甲烷碳同位素的报道资料,绘制了煤层气  $\delta^{13}\text{C}_1$  值的分布范围及其与  $R^o$  值的相关关系图(图 2.1)。为了减小样品差异造成的影响和便于对比,图中选择使用了煤芯一次解吸气和矿井抽放气样品的数据,还包括了煤型气甲烷碳同位素的相关资料。图中所用中国煤层气样品的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值介于  $-73.7\text{‰}$  和  $-24.9\text{‰}$  之间,显示其分布范围很宽,变化复杂,而且在整体上,  $\delta^{13}\text{C}_1$  值与煤岩热演化程度( $R^o$  值)的相关性较低(具体特征后述)。

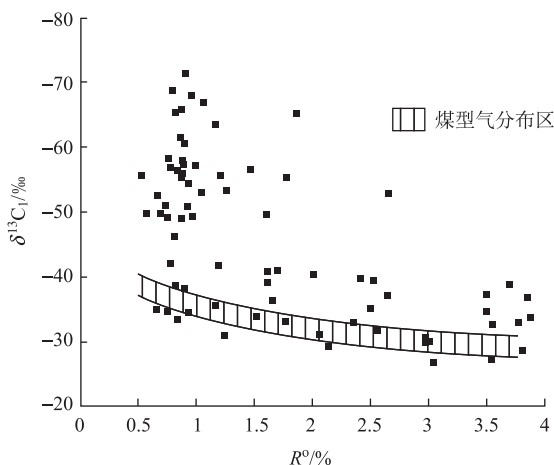


图 2.1 煤层气  $\delta^{13}\text{C}_1$  值的分布特征及其与  $R^o$  的关系(据高波等,2002)

国内有关煤层气氢同位素组成方面的研究与报道很少,基本处于空白状态。本研究报道的安徽新集、山西李雅庄和云南恩洪煤层气的  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值为  $-244\text{‰} \sim -196\text{‰}$  (陶明信等,2005b)。此外,甘肃窑街煤层中高浓度  $\text{CO}_2$  的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值为  $10^{-8}$  量级,表明为壳源型气体(陶明信等,1991,2005a)。

综合以上资料,煤层气的组分构成基本以  $\text{CH}_4$  为主,目前报道的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值的分布范围约为  $-80\text{‰} \sim -16.8\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值约为  $-415\text{‰} \sim -117\text{‰}$ ,  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-39\text{‰} \sim +18.6\text{‰}$ ,重烃的碳同位素数据则更少,尚不能反映其基本分布范围。而煤层气中的氧和硫的同位素研究未见报道,氮同位素及氦同位素仅见于上述新集与窑街煤层气的研究。总体来看,煤层气的同位素地球化学研究水平还相当低。

#### 四、煤层气与常规天然气同位素组成的差异及其特殊性

据统计,我国常规天然气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值的分布范围为  $-66.0\text{‰} \sim -27.7\text{‰}$  (徐永昌等,1994),近期报道的最高值约  $-25\text{‰}$  (赵靖舟,2003);相比之下,煤层气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值的分布范围则宽得多。除前述的煤层气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值的数据范围(约  $-80\text{‰} \sim -16.8\text{‰}$ )外,还有一些例外的数据,如德国煤层气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  最高值达  $-12.9\text{‰}$ ,原苏联煤层气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值最高达  $-10\text{‰}$  (戴金星等,1986);陶明信(2005)曾报道所获得的煤层气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  最高值为  $-10\text{‰}$ ;应育浦等(1990)曾报道南桐煤田两个煤层气样品的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值分别为  $-13.3\text{‰}$  和