



煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书

·卷五

宋岩 张新民 主编

# 煤层气成藏动力条件 及其控藏效应

● 秦勇 傅雪海 韦重韬 侯泉林 姜波 吴财芳 等著



科学出版社  
www.sciencep.com

藏机制及经济开采基础研究丛书·卷五

宋 岩 张新民 主编

# 煤层气成藏动力条件 及其控藏效应

秦 勇 傅雪海 韦重韬 等著  
侯泉林 姜 波 吴财芳

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书作为国内第一部系统探讨煤层气成藏动力学的学术专著,以沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘为主要研究对象,重点针对“煤层气成藏效应与聚散机制”这一科学问题,从构造动力学过程及其对煤层气成藏的控制作用、地下水动力系统与煤层气聚集关系及其机制、热力场控制煤层气储集和分布的特征与机理、动力场耦合过程及对煤层气富集高渗区带的控制作用四个方面开展研究,提出了煤层弹性能及其控藏效应的学术观点,实现了煤层气成藏演化历史的数值分析,建立了煤层气成藏动力学条件耦合分析的思路与方法,构建了基于动力条件的煤层气有利区优选理论框架,对影响煤层气成藏条件的粒度效应、深度效应、煤级效应、地应力效应等进行了扩展性思考。

本书适宜于煤层气、页岩气地质研究领域科研人员以及大型煤层气勘探开发企业决策人员参考,也可作为科研院所研究生的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书:典藏版/宋岩,张新民主编.  
—北京:科学出版社,2018.5

ISBN 978-7-03-052236-8

I. ①煤… II. ①宋… ②张… III. ①煤层-地下气化煤气-油气藏形成-研究②煤层-地下气化煤气-资源开发-研究 IV. ①P618.110.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 057274 号

责任编辑:胡晓春/责任校对:钟 洋

责任印制:张 伟/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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张:172 3/4 插页:2

字数:4 050 000

定价:3298.00 元(共 11 册)

(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。

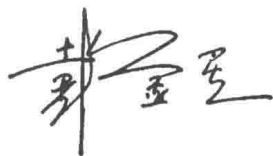
本人有幸加入该项目的跟踪专家行列,从立项到研究启动,一直在关注着

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。首席科学家所做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

煤层气基础地质研究是煤层气产业可持续发展的根本保障。我国通过 30 年来的探索与实践,煤层气产业已基本形成。然而,我国煤层气地质选区成功率依然较低,勘探与开发试验活动存在一定的盲目性;煤层气地面开发活动目前主要集中在华北的部分地区,战略接替基地尚未真正落实。这一现状难以满足国家煤层气产业发展形势和国家能源目标的需求,煤层气基础地质研究的不足是造成这种现状的一个主要原因。煤层气成藏动力条件及其控藏效应则是其中的关键科学问题之一,直接关系到煤层气有利区带的科学预测和国家层面上的煤层气勘探开发战略部署。

煤层气成藏动力学研究是深入认识煤层气地质条件与资源开发潜力的关键。为此,在国家重点基础研究发展计划“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目的支持下,本书作者以沁水盆地和鄂尔多斯盆地为主要对象,于 2003 年在国内率先启动了煤层气成藏动力条件的系统研究。本书即是在此基础上,总结了作者本世纪前十年的相关研究成果和思考,期望形成具有一定系统性且符合我国地质条件的煤层气成藏地质理论,并对推动煤层气勘探与开发技术创新有所贡献。

本书核心内容由秦勇和侯泉林为负责人的“煤层气藏动力条件研究”课题成果构成。课题组围绕“煤层气成藏效应与聚散机制”这一科学问题,分为四个专题开展工作。其中:构造动力条件专题由侯泉林负责,姜波、琚宜文、王继尧、倪善勤、汪吉林、方爱民参加研究工作;地下水动力专题由傅雪海负责,杨永国、彭金宁、魏永强、何也、朱士飞、杨兆彪参加研究工作;热动力专题由韦重韬负责,任战利、孙占学、满磊、张文、肖晖、李佳奇、张盛、高胜利、崔军平参加研究工作;动力学条件耦合专题由秦勇负责,吴财芳、傅国友、陈金刚、周荣福、张晓东、申建、卜英英参加研究工作。

通过研究,在如下方面取得了具有原创意义的研究成果:

1) 在科学思维方面,创立了能量动态平衡系统及其控藏效应的研究思路,其基础是含煤层气系统能量有效传递的显现特征、动力学因素之间组合关系及其地质选择过程,重点在于系统中能量的传递、汇聚和分配方式,理解这些问题是阐释动力条件对煤层气耦合控藏效应和实质的关键。

—2) 在基础研究方面,创立了煤层弹性能及其控藏效应的基础理论,阐释了动力学条件耦合关系及其对煤层气富集高渗条件的控制规律,揭示了含气系统能量动态平衡过程及其控藏机制,在煤层气成藏动力学方面取得了原创性研究成果,形成了我国煤层气基础地质研究的一个重要特色。

3) 在技术研发方面,开发出煤层弹性能数学模型、煤层气地质演化史数值模拟软件、煤层气能量聚散模式等关键技术,解决了关键参数的确定方法,建立了基于动力条件的煤层气富集高渗区带优选评价方法体系。

4) 在有利区带优选评价方面,综合分析了表象动力条件叠合效应、成藏效应三元判别、煤层气能量聚散程度三方面评价的结果,进一步评价了沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘

南段煤层气成藏特点,预测了煤层气富集高渗区带分布规律,提出了研究区今后煤层气勘探开发试验的相关建议。

同时,从地应力场效应、深度效应、煤级效应、粒度效应等方面,进一步深化探讨了煤层气成藏的宏观和微观动力条件。在此基础上,结合作者在国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划(863 计划)、教育部优秀人才基金等项目资助下取得的其他研究成果,形成了本书中的有关学术和技术认识。

本书共分十章,全书由秦勇统稿。执笔人为:第一章,秦勇;第二章,秦勇,韦重韬;第三章,姜波,侯泉林,徐志斌,秦勇,琚宜文;第四章,秦勇,任战利,孙占学;第五章和第六章,傅雪海,秦勇,杨永国;第七章,韦重韬;第八章,吴财芳,秦勇;第九章,秦勇,吴财芳;第十章,秦勇。此外,周荣福、陈金刚、朱士飞、张晓东等的博士学位论文以及宋党育、张盛、彭金宁、满磊、孟健、张文、胡宝群、肖晖、刘丽、巫修平、何也、张志庆等的硕士学位论文也为本书成稿做出了贡献。

现场考察和资料收集得到了晋城煤业集团、阳泉无烟煤集团、潞安矿业集团、霍州煤业集团、汾西煤业集团、山西省煤田地质局、晋中市煤炭管理局、中联煤层气有限责任公司、中国石油勘探开发研究院廊坊分院等单位的大力协助,测试分析和物理模拟实验分别在中国矿业大学分析测试中心、中国石油勘探开发研究院廊坊分院实验中心、华东煤质检测中心等单位完成,研究工作得到了项目专家组、课题跟踪专家唐修义教授和徐永昌教授、973 项目首席科学家宋岩教授和张新民教授、项目办公室以及相关课题专家的帮助指导。合作研究单位中国矿业大学、中国科学院研究生院、西北大学、东华理工大学、中国石油勘探开发研究院从人员、办公条件、实验条件、补充经费等方面保障了研究工作的顺利进行。

同时,本书的相关认识也引用了秦勇负责的国家自然科学基金重点项目(50134040, 40730422)、面上项目(49972052, 40572092)、国际合作项目(40711120365)以及教育部跨世纪优秀人才基金项目、教育部重点项目、教育部博士点基金项目、江苏省“333”人才工程基金项目、江苏省“六大人才高峰”基金项目等的部分成果。

在本书出版之际,谨向以上机构、单位和专家表示诚挚的感谢!

# 目 录

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 序一 .....                   | 贾承造 (i)   |
| 序二 .....                   | 戴金星 (iii) |
| 前言 .....                   | (v)       |
| 第一章 研究基础 .....             | (1)       |
| 第一节 研究意义 .....             | (1)       |
| 第二节 研究现状 .....             | (3)       |
| 一、构造和热动力学条件及其控气作用 .....    | (3)       |
| 二、沉积动力学条件及其控气作用 .....      | (4)       |
| 三、地下水动力学条件及其控气作用 .....     | (5)       |
| 四、煤层气成藏动力学研究发展趋势 .....     | (6)       |
| 第三节 科学问题 .....             | (7)       |
| 一、现存主要问题 .....             | (8)       |
| 二、重点解决的科学问题 .....          | (13)      |
| 第四节 研究方案 .....             | (14)      |
| 一、主要研究内容 .....             | (14)      |
| 二、研究流程与技术方法 .....          | (15)      |
| 三、预期目标 .....               | (17)      |
| 第二章 煤层气地质背景 .....          | (18)      |
| 第一节 地层与含煤地层 .....          | (18)      |
| 一、沁水盆地地层与含煤地层 .....        | (18)      |
| 二、鄂尔多斯盆地东缘南段地层与含煤地层 .....  | (24)      |
| 第二节 构造及岩浆活动 .....          | (30)      |
| 一、区域地质发展史 .....            | (30)      |
| 二、沁水盆地构造特征 .....           | (32)      |
| 三、鄂尔多斯盆地东缘南段构造特征 .....     | (36)      |
| 四、岩浆活动 .....               | (38)      |
| 第三节 煤级与煤层含气量 .....         | (42)      |
| 一、沁水盆地煤级与煤层含气量 .....       | (42)      |
| 二、鄂尔多斯盆地东缘南段煤级与煤层含气量 ..... | (44)      |
| 第四节 煤层气资源 .....            | (47)      |
| 第三章 煤层气成藏构造动力条件 .....      | (50)      |
| 第一节 基本概念与研究方法 .....        | (50)      |
| 一、构造应力与构造应力场 .....         | (50)      |
| 二、古构造应力场与现代构造应力场 .....     | (51)      |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 三、构造应力场研究流程 .....                | (52)  |
| 四、构造应力场有限元数值模拟 .....             | (53)  |
| 第二节 盆地构造应力场及其演化 .....            | (54)  |
| 一、沁水盆地构造应力场 .....                | (54)  |
| 二、鄂尔多斯盆地构造应力场 .....              | (64)  |
| 第三节 盆内构造分异及其控气特征 .....           | (67)  |
| 一、区域构造背景与盆地构造形成 .....            | (67)  |
| 二、现代构造应力场对煤层渗透性的控制 .....         | (69)  |
| 三、构造曲率对煤层渗透性的控制作用 .....          | (75)  |
| 四、煤层微观应变及其成藏动力意义 .....           | (78)  |
| 第四节 构造动力条件耦合控气格局 .....           | (80)  |
| 第四章 煤层气成藏热动力条件 .....             | (82)  |
| 第一节 石炭二叠系煤层埋藏历史 .....            | (82)  |
| 一、含煤地层上覆地层厚度恢复 .....             | (82)  |
| 二、煤层埋藏历史与埋藏阶段 .....              | (85)  |
| 三、煤层埋藏史地质模式 .....                | (86)  |
| 四、煤层埋藏史与煤层气的保存 .....             | (89)  |
| 第二节 地温场特征及其演化 .....              | (90)  |
| 一、区域地温场及其演化历史 .....              | (90)  |
| 二、沁水盆地地温场及其演化历史 .....            | (93)  |
| 三、鄂尔多斯盆地东缘南段地温场及其演化历史 .....      | (96)  |
| 第三节 燕山运动中后期构造热事件 .....           | (103) |
| 一、构造热事件发生时期 .....                | (103) |
| 二、构造热事件的强烈性、非均一性和瞬时性 .....       | (104) |
| 三、异常高热古地温场形成的地质-地球化学机制 .....     | (108) |
| 第四节 热动力特征与煤层气富集条件 .....          | (113) |
| 一、沁水盆地古热场的控气地质特征 .....           | (113) |
| 二、鄂尔多斯盆地东缘古热场的控气地质特征 .....       | (115) |
| 第五章 煤层气成藏水动力条件 .....             | (117) |
| 第一节 水文地质单元边界及其控气特征 .....         | (117) |
| 一、沁水盆地水文地质单元及其边界控气特征 .....       | (117) |
| 二、鄂尔多斯盆地东缘水文地质单元及其边界控气特征 .....   | (121) |
| 第二节 现代地下水动力场与煤层气富集 .....         | (124) |
| 一、沁水盆地现代地下水动力场与煤层气富集 .....       | (124) |
| 二、鄂尔多斯盆地东缘现代地下水动力场与煤层气富集 .....   | (137) |
| 第三节 现代地下水地球化学场及其控气特征 .....       | (141) |
| 一、沁水盆地地下水地球化学场与煤层气保存条件 .....     | (141) |
| 二、鄂尔多斯盆地东缘地下水地球化学场与煤层气保存条件 ..... | (149) |
| 第四节 地下水系统与煤层气成藏能量动态平衡 .....      | (151) |
| 一、甲烷在煤层水中溶解度的温压物理模拟 .....        | (151) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 二、煤储层气-水两相流在煤层气聚散中的作用 .....    | (155) |
| 三、盆地内部地下水动力条件控气作用的显现形式 .....   | (157) |
| <b>第六章 煤层渗透率与成藏动力条件</b> .....  | (161) |
| 第一节 耦合分析理论与方法 .....            | (161) |
| 一、煤储层应力渗透率及其数学模型 .....         | (161) |
| 二、煤储层气-水两相流特性物理模拟 .....        | (163) |
| 三、煤层气解吸诱导煤储层渗透率变化数值模拟 .....    | (169) |
| 第二节 沁水盆地南部煤层的应力渗透率 .....       | (170) |
| 一、煤储层应力渗透率地质模型 .....           | (171) |
| 二、煤储层应力渗透率力学模型 .....           | (171) |
| 三、煤储层应力渗透率及其解析模型 .....         | (174) |
| 第三节 相对渗透率对煤层气成藏过程的影响 .....     | (176) |
| 一、沁水盆地煤相对渗透率的基本特点 .....        | (176) |
| 二、煤层气聚散历史中的煤储层气-水两相流 .....     | (177) |
| 三、煤层气解吸诱导的煤储层渗透率演化 .....       | (178) |
| 第四节 煤基块弹性自调节作用与成藏效应 .....      | (184) |
| 一、煤层裂隙开合程度及其对成藏效应的影响 .....     | (184) |
| 二、煤基块弹性自调节效应物理模拟 .....         | (185) |
| 三、煤基块弹性自调节效应模式 .....           | (188) |
| 四、高煤级煤成藏的弹性自封闭效应 .....         | (191) |
| <b>第七章 煤层气聚散历史及其区域分异</b> ..... | (192) |
| 第一节 煤层气聚散历史数学模型 .....          | (192) |
| 一、煤层气聚散动态平衡子模型 .....           | (192) |
| 二、煤层气生成-储层压力-赋存子模型 .....       | (192) |
| 第二节 煤层气聚散历史数值模拟软件系统 .....      | (200) |
| 一、数值模拟软件基本功能 .....             | (200) |
| 二、数值模拟软件基本结构 .....             | (201) |
| 第三节 沁水盆地煤层气聚散作用 .....          | (202) |
| 一、沁水盆地煤层气地质模型 .....            | (202) |
| 二、沁水盆地煤层气聚散作用阶段 .....          | (205) |
| 三、沁水盆地煤层气聚散作用区域分异 .....        | (208) |
| 第四节 鄂尔多斯盆地东缘煤层气聚散作用 .....      | (218) |
| <b>第八章 煤层弹性能及其控藏效应</b> .....   | (221) |
| 第一节 煤层弹性能的物理与数学描述 .....        | (221) |
| 一、煤层弹性能总体构成 .....              | (221) |
| 二、煤层弹性能数学模型推导 .....            | (222) |
| 三、煤层弹性能的一般影响因素 .....           | (224) |
| 第二节 煤层弹性能成藏贡献的定量表征 .....       | (234) |
| 一、煤层气成藏宏观动力能和微观动力能 .....       | (234) |
| 二、煤层气压力系统发育程度定量表征 .....        | (236) |
| 三、煤层气运移系统发育程度定量表征 .....        | (237) |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 第三节 煤层弹性能及其参数的成藏演化·····         | (238)        |
| 一、煤层弹性能地质演化历史·····              | (238)        |
| 二、煤层气压力系统地质演化历史·····            | (244)        |
| 三、煤层气运移系统地质演化历史·····            | (250)        |
| 第四节 基于弹性能的煤层气成藏类型与聚散模式·····     | (252)        |
| 一、煤层气成藏效应三元判别模式·····            | (253)        |
| 二、煤层气成藏能量聚散模式·····              | (255)        |
| <b>第九章 基于动力条件的煤层气有利区优选·····</b> | <b>(257)</b> |
| 第一节 煤层气有利区优选方法发展历史·····         | (257)        |
| 第二节 煤层气有利区动力条件优选思路与流程·····      | (259)        |
| 一、煤层气有利区动力条件优选思路·····           | (259)        |
| 二、煤层气有利区动力条件优选流程·····           | (261)        |
| 第三节 沁水盆地煤层气富集高渗区带·····          | (262)        |
| 一、表象动力条件叠合法优选·····              | (262)        |
| 二、煤层气成藏效应法优选·····               | (264)        |
| 三、煤层气能量聚散模式优选·····              | (268)        |
| 四、煤层气有利区带综合优选·····              | (271)        |
| 第四节 鄂尔多斯盆地东缘南段煤层气富集高渗区带·····    | (271)        |
| 一、表象动力条件叠合法优选·····              | (271)        |
| 二、煤层气成藏效应法优选·····               | (274)        |
| 三、煤层气能量聚散模式法优选·····             | (276)        |
| 四、煤层气有利区带综合优选·····              | (278)        |
| <b>第十章 煤层气成藏动力学研究的扩展思考·····</b> | <b>(279)</b> |
| 第一节 影响煤层渗透性发育的地应力效应·····        | (279)        |
| 一、我国地应力分布规律与特点·····             | (279)        |
| 二、地应力场与煤层渗透性·····               | (285)        |
| 第二节 影响煤层气成藏动力条件的深度效应·····       | (286)        |
| 一、深部煤层气资源及其开发潜力·····            | (286)        |
| 二、地温场和应力场耦合作用下的煤层含气量临界深度·····   | (288)        |
| 三、深部应力场作用下的煤层渗透性分布特点·····       | (290)        |
| 四、深部煤层流体动力分布特点·····             | (292)        |
| 第三节 影响煤层含气动力条件的煤级效应·····        | (293)        |
| 一、低煤级煤层气资源及其开发潜力·····           | (294)        |
| 二、低煤级煤的孔隙结构与吸附性·····            | (295)        |
| 三、低煤级煤层气的赋存状态·····              | (296)        |
| 第四节 影响煤层气成藏动力条件的粒度效应·····       | (297)        |
| 一、我国构造煤分布规律与特点·····             | (298)        |
| 二、构造煤煤层气资源及其开发潜力·····           | (301)        |
| 三、煤吸附行为粒度效应模拟实验及其启示·····        | (302)        |
| <b>参考文献·····</b>                | <b>(308)</b> |

# 第一章 研究基础

将煤层气作为天然气资源进行商业性开采,是世界油气工业史上的一个重要里程碑(Flores,1998)。1977年,美国的世界上第一口煤层气井产出工业气流,拉开了世界煤层气资源性开发的序幕。目前,美国、加拿大、中国、澳大利亚等实现了煤层气地面规模性商业开采,美国近十年来的煤层气年产量占其本土天然气总产量的8%左右。世界上另有30余个国家和地区正在进行或曾经开展过煤层气勘探与开发试验,其中约一半的国家产出了煤层气流(Fischer,2004)。我国煤层气勘探与开发试验已迈入第四个十年,目前在局部地区实现了商业性开发的突破。在此期间,国内在煤层气基本地质条件和成藏特征方面做了大量卓有成效的研究工作,取得了一系列新的成果和认识,但仍存在一些关键科学技术问题(秦勇,2001,2003,2006a)。鉴于此,欲在现有基础上实现新的突破,有必要深入分析研究现状,明确科学问题,提出创新研究思路。

## 第一节 研究意义

化石能源是国际竞争的重要战略资源。煤层气作为一种潜力巨大的优质洁净替代能源,受到世界多数产煤国家或地区的高度关注。我国煤层气开发前景巨大,目前处于煤层气产业规模性发展的初期阶段,制约煤层气商业性开发的关键科学问题亟待突破。

首先,开发煤层气是实现国家能源发展战略目标、保障国家能源安全的重大需求。国民生产总值每增加1%,能源需求必须增长0.5%。我国目前能源年增长速率只有2%左右,与为适应国民经济增长速度所需的4%~5%能源增长率相差甚远。预计到2015年,我国天然气对外依存度将达30%。然而,我国丰富的煤层气资源至今还未得到有效开发。据国土资源部2006年全国煤层气资源评价成果,我国埋深2000m以浅的煤层气资源量 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,与陆上常规天然气资源量基本相当(车长波等,2008)。我国煤层气一旦得以规模性高效开发,则有可能使我国优质一次能源产量实现跨越式增长,进而有效地缓解洁净优质能源供需缺口对国民经济可持续发展带来的压力。赋存于地下的煤层气作为矿井瓦斯灾害的根本来源,对煤矿安全生产构成重大危害。据国家煤矿安全监察局统计,2007年全国矿井瓦斯事故占煤矿事故的28.6%,死亡近500人,国家财产也蒙受巨大损失。我国采煤活动每年向大气释放出大量的煤层甲烷气体,2000年约 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,2010年达到 $215 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占全球采煤来源甲烷温室气体排放量的50%以上(表1.1)。因此,开发利用我国丰富的煤层气资源,具有增加优质洁净能源供给、有效缓解大气温室效应、从根本上遏制矿井瓦斯灾害的三重效益,是实现国家关于“开发新能源,实现能源利用与环境保护同步,保证可持续发展”能源战略需求的一条现实途径。

表 1.1 世界主要产煤国家矿井瓦斯向大气排放趋势

| 国 家  | 排放量/ $10^8\text{m}^3$ |        |        | 国 家   | 排放量/ $10^8\text{m}^3$ |        |        |
|------|-----------------------|--------|--------|-------|-----------------------|--------|--------|
|      | 1990 年                | 2000 年 | 2010 年 |       | 1990 年                | 2000 年 | 2010 年 |
| 中国   | 76                    | 100    | 215    | 德国    | 18.5                  | 10.5   | 8.5    |
| 美国   | 61.5                  | 50     | 58.5   | 印度    | 6                     | 6.5    | 13     |
| 俄罗斯  | 41.5                  | 21.5   | 20.5   | 南非    | 22                    | 5      | 5      |
| 乌克兰  | 40.5                  | 20     | 17.5   | 哈萨克斯坦 | 11                    | 5      | 4.5    |
| 澳大利亚 | 16                    | 16.5   | 20.5   | 英国    | 8                     | 4      | 3.5    |
| 波兰   | 17.5                  | 10.5   | 9.5    | 捷克    | 6                     | 4      | 3      |

第二，解决我国煤层气地质的“瓶颈”问题，需要深入理解相关基础地质问题。煤层气主要以吸附态赋存在煤层中，有别于呈游离状态赋存的常规天然气，因此煤层气的成藏机制和开发原理与常规天然气极为不同。国外煤层气地质理论及开发技术主要起源于简单地质条件和相对高渗背景的煤层气成藏系统，我国煤层气资源主要赋存在地质历史复杂的晚古生代—中生代含煤地层，具有煤储层非均质高以及渗透性、储层压力和含气饱和度偏低的“三低一高”的总体特征，使国外有关理论与开发技术在我国的应用受到局限。截至 2010 年年底，我国煤层气探明储量只有  $2902\times 10^8\text{m}^3$ ，仅占总资源量的 0.79%，探明率非常之低，无法满足从煤层气资源大国向煤层气资源开发强国跨越的国家需求。此外，我国目前煤层气地面商业性开发工程集中在沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东部，突破了高煤级煤层商业性开发这一被国外视为的煤层气地面开发“禁区”，但多个盆地历经 30 余年的勘探与开发试验，至今没有取得商业性开发的理想效果。这些事实表明，煤层气开采技术的不断创新，需要结合我国煤储层实际地质条件开展。为此，针对我国具体地质条件，通过对关键基础科学问题的深入研究，阐明煤层气成藏与分布规律以提供可靠资源保障，探索低渗条件下煤层气增产的物理化学机制以带动开发新技术的形成，正是突破上述“瓶颈”进而实现我国煤层气高效开发的迫切需求与必由途径。

第三，开展我国煤层气成藏动力条件先导性基础研究的条件基本具备。自国家“八五”计划以来，我国根据自身的煤层气赋存特点与开发条件，广泛开展了相关理论与开发技术的探讨，较为清醒地认识到我国煤层气成藏与分布规律的复杂性，针对我国煤储层低渗特点的相关开发技术研究取得显著进展。煤层气地面商业性开发在沁水、鄂尔多斯、阜新等盆地已经实现，排采实验在华北、华南、东北的十余个地区取得单井产气突破，地面水平分支井最高日产在高煤级煤地区可达  $100000\text{m}^3$ ，昭示出中国煤层气开发的巨大潜势，在实践中突破了关于高煤级煤地区无法实施地面开发的国外现行煤层气理论的局限性，由此掀起了新一轮中国煤层气开发技术创新的热潮。截至 2010 年年底，全国共施工各类煤层气井 5407 口，其中绝大部分是 2006 年以来新施工的煤层气开发井。全国地面井煤层气产量从 2004 年的  $0.1\times 10^8\text{m}^3$  提高到 2010 年的  $15.89\times 10^8\text{m}^3$ ，实现了“十亿”大关的突破。全国煤层气矿井抽采量从 2004 年的  $16.95\times 10^8\text{m}^3$  剧增至 2010 年的  $73.50\times 10^8\text{m}^3$ ，增幅达 4.3 倍；在此期间，百万吨煤炭产量死亡率从 3.08 人降至 0.75 人，接近了世界煤矿安全生产的先进水平。大量的前期研究与探索，不仅揭示出我国煤层气商业性开发所面临的关键科学问题，同时为解决这些问题以推动我国煤层气产业尽快形成提供

了丰富的资料和实践基础。

煤层气基础地质研究是煤层气产业可持续发展的根本保障。我国通过 30 年来的探索与努力,煤层气产业已基本形成。然而,我国前期煤层气地质选区成功率只有 35% 左右,勘探与开发试验活动存在一定的盲目性,难以满足产业发展形势和国家目标的需求;目前的煤层气地面开发活动主要集中在华北沁水盆地和鄂尔多斯盆地,地理分布极不平衡,战略接替基地尚未真正落实。煤层气基础地质研究的广度和深度不足是造成这种现状的主要因素之一。其中,煤层气成藏动力学及其控藏效应则是关键科学问题之一,直接关系到煤层气有利区带的科学预测和国家层面上的煤层气勘探开发战略部署。

## 第二节 研究现状

从能量平衡系统的视角来考察煤层气成藏的动力学条件及其配置关系是本书作者提出的具有创新意义的学术思想,目前未见其他研究成果报道。但是,关于煤层气成藏的构造动力学条件、热力学条件以及地下水条件,前人做过较多研究,其中不乏具有新意、且对煤层气勘探实践具有指导意义的研究成果。

### 一、构造和热动力学条件及其控气作用

从广义上讲,构造因素直接或间接地控制着从含煤地层形成至煤层气生成聚集过程中的每个环节,是所有地质因素中最为重要而直接的控气因素。在聚煤期,构造控制着煤系地层和煤层形成发育的特征,影响到煤层气的生成、储集、封盖潜势;在聚煤期后,构造特征及其演化通过对构造变形和热历史的限定,不仅对煤层气生成、储集、封盖性能产生影响,而且直接控制了煤层气的运移、聚集、保存特征,从而决定着特定地区煤层气资源开发潜力的大小。

含煤盆地的基底性质及其所处的大地构造位置,对于煤层气的形成、富集和开发前景有决定性意义(张德民、林大扬,1998)。研究表明:地台基底型含煤盆地和地台与褶皱带过渡区含煤盆地具有良好的煤层气资源条件和开发前景,如华北地台及上扬子地台上的晚古生代盆地、华北地台北缘的中生代盆地;中间地块基底型含煤盆地煤层气资源和前景差异很大,如佳木斯地块上及松辽地块东缘的早白垩世盆地、准噶尔地块南缘的早-中侏罗世盆地等资源条件较好,其他大部分盆地前景较差;褶皱带基底型含煤盆地煤层气资源和开发条件总体上较差,但某些盆地也有一定的前景,如天山海西褶皱带和祁连加里东褶皱带上的早-中侏罗世盆地。

不同类型的地质构造,在形成过程中构造应力场特征及其内部应力分布状况的不同,均会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等出现差异,进而影响到煤储层的含气性和可采性。根据形态、动力学条件以及不同构造样式的控气地质特征,我国研究者将与煤层气有关的构造归纳为向斜构造、背斜构造、褶皱-逆冲推覆构造和伸展构造 4 个大类 10 种型式,进而结合断层的运动学特征总结出与其相应的 14 种构造样式(叶建平等,1999)。在此基础上,进一步总结了我国煤层气主要聚气带和目标区的基本构造形态,分析了构造类型与煤储层含气性之间关系的区域展布规律。

热动力学条件及其控制下的生气特征,是煤层气富集或逸散的重要控制因素之一。通过研究,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(杨起、汤达祯,2000)。相关的热场特征及生气因素包括三个关键方面:一,在燕山期热事件中二次有效受热(二次生气作用)历史;二,二次有效受热条件下的生气过程和生气阶段;三,生气作用停止后煤储层的埋藏历史。由此,并结合特定地区煤化作用和生气特征,将热动力学条件与煤层气生成保存条件之间的关系总结为不同的类型(秦勇等,1997;秦勇、宋党育,1998)。例如:山西南部包括三种类型,第一种类型位于晋城-翼城、临汾-洪洞和沁源-沁县三个地区,二次有效受热历程长,经历了1~2个生气高峰阶段,生气作用停止时已达干气阶段,煤储层在煤层气逸散带中停留时间短或从未暴露于逸散带,煤层气的保存条件最好,其中晋城一带是区内目前已知含气性最好的地区。

区域构造背景控制之下的古构造应力场决定了煤储层裂隙的发育特征,现代构造应力场控制着裂隙的开合程度,两者共同控制了煤储层渗透率的高低。基于对典型盆地的分析研究,发现裂隙优势发育方向与现代构造应力场主应力方向之间的关系控制了煤储层裂隙的开合性质,现代构造应力场主应力差与煤储层渗透率呈指数关系且高度相关(秦勇等,1999b)。由此揭示:古、今构造应力场主应力方向的大方位转换有利于煤层气的保存及煤储层渗透率的增加,现代构造应力场相对应力的大小决定了渗透率增减的幅度,进而建立了构造应力场-煤储层渗透率耦合控气的地质模式和数学模型,为根据构造应力场特征来定量预测煤储层渗透率提供了基础。

## 二、沉积动力学条件及其控气作用

沉积-储盖型式耦合关系或沉积体系域,对煤层气成藏具有显著的控制作用。在不同的沉积体系中,煤层赋存于成因地层单元(旋回)中的不同位置,与顶板甚至顶板之上一定距离内的围岩构成各式各样的组合关系,形成了在区域上具有一定展布规律的六种储盖组合基本成因类型。根据对煤储层封盖能力的强弱,它们又可进一步被归纳为三大类别(秦勇等,2000a):第一大类包括浅海-障壁海岸和湖泊两种类型,对煤储层的封盖能力较强;第二大类为滨海三角洲类型,是我国晚古生代含煤地层的主要沉积体系,但封盖能力变化较大;第三类别包括浅海-无障壁海岸、河流和冲积扇三种类型,封盖能力总体上较差。基于这一认识,进一步对华南上二叠统龙潭组、华北石炭-二叠系的储盖组合进行了分析,并就煤储层含气性的区域分布进行了预测(叶建平等,1999;秦勇等,2000a;傅雪海,2001)。同时,初步讨论了近海相地层体系域中煤层顶底板、地层叠置关系、层序界面等与煤层气聚散条件之间的关系,认为低位体系域有利于煤层气的保存(金高峰、龚绍礼,2001);率先将层序地层学的有关思想和方法引入陆相盆地煤层气地质研究,发现体系域的层序地层构型对煤层气成藏的地质要素和潜势具有显著影响,认为A型体系域最有利于煤层气的成藏(桑树勋等,2002)。

煤储层的几何特征系指煤层在三维空间的展布形式,包括煤层厚度、煤层稳定性、煤层结构等,对煤储层含气性和物性有一定影响,同样是控气系统中的重要地质因素。控气地质因素的复杂性,导致很多地区煤储层厚度与含气性之间并无因果联系,但也不乏两者之间具明显正相关趋势的实例,例如铁法、淮南、邢台、临城、石嘴山、宝积山、萍乡、丰城、