



煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书

卷二

宋岩 张新民 主编

煤层气的成因和类型 及其资源贡献

● 陶明信 王万春 段毅 解光新 张枝焕 辛明秀 等著



科学出版社
www.sciencep.com

成藏机制及经济开采基础研究丛书·卷二

宋 岩 张新民 主编

煤层气的成因和类型 及其资源贡献

陶明信 王万春 段 毅 等著
解光新 张枝焕 辛明秀

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以煤层气的成因、类型及其资源贡献为核心研究内容,围绕煤层气的形成与演化、母源物质与形成途径、地球化学组成与成因类型、资源潜力、形成条件、成藏地球化学等问题展开系统的研究。全书共分十二章。第一章介绍煤层气开发、煤岩生烃动力学与煤层气成因类型研究概况。第二章至第五章主要研究煤层气的成因问题。其中第二章论述热成因煤层气的形成演化与煤岩生烃动力学问题,并对典型实例区煤层气的生成量和资源量进行预测或估算;其余三章论述次生生物成因煤层气的相关问题,包括煤中的微生物与微生物产气实验、煤的微生物降解与生气标志、次生生物成因煤层气的母质与形成途径等。第六章至第十章研究煤层气的成因类型,共识别出五种煤层气成因类型,论述了各成因类型的地球化学组成及其示踪指标与相关标志,进而讨论了各成因类型煤层气的资源潜力。第十一章主要探讨煤层气的地球化学组成与煤岩及构造演化的关系。第十二章以沁水盆地南部为典型地区,进行了煤层气成藏地球化学研究。

本书可供煤层气及煤矿瓦斯、常规油气、气体/同位素地球化学、能源地质等领域的科技人员参考,也可作为相关专业研究生的参考教材。

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:李 影

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。

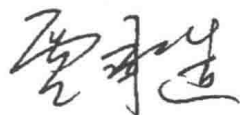
建立符合中国地质特征的煤层气基础理论,为形成中国煤层气产业提供科学技术支撑,是中国科技工作者面临的紧迫任务。经过各方面的共同努力,

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。

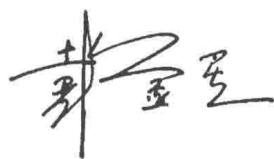
本人有幸加入该项目的跟踪专家行列,从立项到研究启动,一直在关注着

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

煤层气是在煤层中形成并聚集的以甲烷为主的气体,曾长期被简单地作为有害气体对待。直到上世纪后期,由于发生能源危机,美国从潜在资源角度,立项对煤层气进行系统研究与勘探开发试验,成功地实现了煤层气的商业性生产,从而也证明煤层气是一种可进行地面规模性开发的新的能源资源。

煤层气研究因具有资源利用、煤矿减灾和环境保护三方面的重要意义而成为全球性的热点领域。

我国在煤层气领域也进行了多方面的研究与开发试验工作。2002年年底,科技部批准设立了国家重点基础研究发展计划项目(简称973项目)“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”。其01课题(编号:2002CB211701)第一期的名称为“煤层气形成的动力学过程及资源贡献”,负责单位为中国科学院兰州地质研究所和煤炭科学研究总院西安分院,参加单位有中国石油大学(北京);01课题第二期的名称为“煤层气的形成演化、成因类型及资源贡献”,负责单位为北京师范大学和煤炭科学研究总院西安分院,参加单位有中国科学院兰州地质研究所。2008年10月12日在北京举行的课题验收会上,01课题组提交了课题结题报告和课题成果报告等材料,进行了汇报,通过了验收。

课题验收之后,准备成书出版。在此过程中,从专著的体系化角度考虑,经进一步调研并征求有关专家意见,根据国内外在此领域的研究现状,拟以煤层气的形成机理与成因类型及其资源潜力作为核心内容,加强或补充各类型煤层气形成的地质条件以及煤层气地球化学组成与煤岩及构造演化关系的研究,探讨煤层气成藏地球化学,由此构成系统的研究与论述体系。为此,根据上述思路与目标,在课题成果报告的基础上,重新编制了全书的章节体系,进行了修改补充或重新撰写。其间又断续历经数年,终于2012年9月完稿,得以付梓出版。

本书共包括十二章。第一章扼要介绍煤层气开发与成因类型研究方面的概况。第二章至第五章主要研究煤层气的成因问题,包括其形成机理、演化及母质等相关问题。其中第二章研究热成因煤层气的形成演化与煤岩生烃动力学问题,并对典型实例区煤层气的生成量和资源量进行预测或估算;其余三章研究次生生物成因煤层气(简称次生生物气)的相关问题,包括煤中的微生物与微生物产气实验、煤的微生物降解与生气标志、次生生物成因煤层气的母质与形成途径等方面。第六章至第十章研究并论述煤层气的成因类型。具体鉴别并划分出了原生生物成因煤层气、次生生物成因煤层气、热降解成因煤层气、热裂解成因煤层气和混合成因煤层气共五种成因类型。对这五种成因类型分章进行了较系统的研究:在测试并阐述有关地区煤层气的地球化学组成与特征的基础上,结合其地质条件或产出背景,对其成因类型进行综合分析论证,由此也得出或阐述了鉴别其成因类型的各种地球化学示踪指标与相关标志,进而讨论了各成因类型煤层气的资源潜力。

第十一章主要探讨煤层气的地球化学组成与煤岩及构造演化的关系。第十二章以沁水盆地南部为典型地区,开展了煤层气成藏地球化学研究。

如本书相关章节所述,国际上一般根据常规天然气的有关理论和方法,将煤层气划分为生物(细菌)气和热成因气两种成因类型,并在较早阶段认为煤层中保留下来的基本属于热成因气;后来又提出了次生生物气,但对其形成机理、形成途径与形成标志等缺乏系统深入的研究。在参考相关研究文献的基础上,本研究拓展了多方面新的研究途径或研究方法,并对诸多新的科学问题展开研究,获得了初步而又较系统的研究成果(认识),主要体现在如下几方面:

1) 对次生生物气的母源物质、形成途径及形成地质条件开展了系统的研究,并对产次生生物气的煤样进行了微生物学研究,从中检测出了产甲烷菌并进行了产气实验。从而基本搞清了煤中形成次生生物气的机理及相关问题,并回答了煤中能否再形成(次生)生物气的疑问。

2) 从气-源物质及其转化的动态演变角度,对于可能构成次生生物气先质或母质的煤中可溶有机质与热成因气,是否也经历过微生物的降解,以及其相关特征所蕴含的信息开展了研究。结果显示,相关地区煤层中的上述两种物质均明显遭受过微生物的降解,而且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值具负相关关系,清楚而直观地反映出热成因 CO_2 被微生物还原为 CH_4 的演变踪迹。

3) 国际上研究次生生物气,主要是研究其自身或原始的地球化学组成特征并以此作为其判识指标。本书则从生成次生生物气的煤层一般先形成热成因气这一基本特点或事实出发,提出这两种先后形成的不同成因的气体在同一煤层空间聚集混合,则必产生气体地球化学“叠加效应”,而此“叠加效应”则是研究并获取次生生物气相关信息的重要新途径。研究结果初步揭示出此“叠加效应”的一系列具体的地球化学特征与变化规律,对于识别次生生物气,特别是此类既含次生生物气,又含一定热成因气的混合成因煤层气,具有更客观更普遍的意义与更实用的价值。

4) 系统地研究并鉴别了煤层气的成因类型,具体划分为:原生生物成因煤层气、次生生物成因煤层气、热降解成因煤层气、热裂解成因煤层气和混合成因煤层气,构成目前最系统的煤层气成因类型划分方案及其相应的综合示踪指标体系。

5) 对煤在各热演化阶段所产生的热成因气的组分构成与含量变化进行了系统的热模拟研究,提出了热成因煤层气组分构成的演化模式;对典型地区煤的生烃动力学特征与煤层气生成量进行了研究与估算。

6) 对煤层气成藏地球化学和煤层气地球化学组成与煤岩及构造演化的关系开展了研究,初步揭示了其相关特征。

7) 除气体组分外,国际学术界研究煤层气所涉及的同位素多为甲烷与二氧化碳的碳同位素,部分文献涉及甲烷的氢同位素及乙烷等重烃的碳同位素。本书除相关组分的碳同位素外,对各成因类型煤层气甲烷的氢同位素进行了系统的测试与研究,此外,还对少量煤层气样品的氮同位素与氦同位素进行了研究。

8) 由煤层气的形成机理—母源物质—成因类型及其资源潜力—成藏地球化学等内

容构成了一个较完整的研究与论述体系,是本书最主要的特点。

本书是在课题成果报告及有关资料的基础上,由陶明信执笔,完成全书的章节编制、修改补写与统稿工作。各章执笔人分别为:第一章,陶明信、段毅;第二章,段毅、吴保祥;第三章,辛明秀、陶明信;第四章,王万春;第五章,陶明信、王万春;第六章至第九章,陶明信;第十章,陶明信、王万春、史宝光;第十一章,解光新、王彦龙、王万春、陶明信;第十二章,张枝焕、李伟;前言和结束语,陶明信。

除上述人员外,先后参与野外考察采样、实验测试、图件绘制等相关工作的还有李晶莹、高波、张小军、李中平、苏晨辉、肖文钊、李晓斌、康晏、马玉贞、高中亮、卢超、刘朋阳等。

目 录

序一	贾承造 (i)
序二	戴金星 (iii)
前言	(v)
第一章 煤层气开发与成因类型研究概况	(1)
一、煤层气勘探开发及研究概况	(1)
二、煤岩生烃动力学研究进展	(4)
三、煤层气成因类型与划分研究概况	(9)
第二章 煤岩生烃动力学与热成因煤层气的形成演化	(12)
一、样品及实验方法	(12)
二、煤岩和泥炭热解煤层气的组成特征	(13)
三、煤岩和泥炭热解煤层气的生成和演化	(13)
四、煤层气组分的阶段演化特征	(26)
五、沁水盆地煤岩生烃动力学模拟实验	(29)
第三章 煤层中的微生物种群与产甲烷实验	(46)
一、煤岩中的异养细菌	(46)
二、煤中的产甲烷古菌研究	(48)
三、煤中产甲烷菌的产甲烷实验	(55)
四、前人有关煤岩微生物产气率的实验结果	(57)
第四章 煤的微生物降解与生气标志	(59)
一、煤岩样品及其可溶有机质含量	(59)
二、煤岩的热演化与沉积环境特征	(60)
三、煤岩物质的微生物降解特征	(64)
四、 iC_{25} 和 iC_{30} 等无环类异戊二烯烷烃及其地质意义	(66)
五、煤岩有机地球化学特征与煤层气的生成	(68)
第五章 次生生物成因煤层气的母质、形成途径与构造环境	(71)
一、煤中形成次生生物气的主要母源物质	(71)
二、次生生物气的形成机理与生成途径	(75)
三、次生生物成因煤层气形成的构造环境条件	(77)
四、讨论与认识	(81)
第六章 原生生物成因煤层气	(82)
一、气样的地球化学测试及采集方法	(82)
二、新疆沙尔湖地区原生生物成因煤层气	(83)
三、沙尔湖煤层气成因类型综合分析	(86)
四、与常规生物气的对比分析	(87)

五、原生生物成因煤层气的资源意义与潜力讨论	(89)
第七章 次生生物成因煤层气	(91)
一、李雅庄煤田地质概况	(92)
二、煤层气地球化学组成特征与成因类型分析	(93)
三、李雅庄次生生物气的形成条件与资源意义	(96)
第八章 热降解成因煤层气	(97)
一、宝积山煤田地质概况	(97)
二、煤层气的地球化学组成特征	(100)
三、宝积山煤层气的生成机理与成因类型分析	(103)
四、热降解成因煤层气的资源潜力讨论	(105)
五、结论与认识	(105)
第九章 热裂解成因煤层气	(106)
一、沁水盆地煤田地质概况	(107)
二、煤层气的地球化学组成特征	(107)
三、煤层气的成因类型分析与示踪指标	(110)
四、热裂解成因煤层气的资源潜力	(112)
第十章 混合成因煤层气	(115)
一、淮南煤田及新集地区地质概况	(115)
二、煤层气地球化学组成特征	(116)
三、煤层气的成因类型综合示踪研究	(121)
四、次生生物气与热成因气的混合比例估算	(123)
五、混合成因煤层气的地球化学示踪指标与资源潜力	(124)
六、讨论与认识	(126)
第十一章 煤层气的地球化学组成与煤岩及构造演化的关系——以河东煤田为例	(127)
一、煤田地质背景	(127)
二、煤层的厚度和变质程度与地质构造的关系	(129)
三、煤的显微组分构成与含气量的关系	(131)
四、煤层气组分、煤 R^o 值与埋深及构造活动的关系	(134)
五、煤层气的成因类型与形成条件分析	(136)
第十二章 煤层气成藏地球化学研究	(139)
一、煤田地质背景、样品与实验方法	(139)
二、流体包裹体的特征与均一化温度	(141)
三、煤岩、煤层夹矸或顶板砂岩显微组分和烃类抽提物组成特征	(144)
四、煤层生排烃时期与成藏史分析	(145)
五、讨论与认识	(149)
结束语	(150)
参考文献	(152)

第一章 煤层气开发与成因类型研究概况

一、煤层气勘探开发及研究概况

(一) 煤层气及其地质研究概况

煤层气(coalbed gas)是在煤炭形成演化过程中伴生的气体,并储集在煤层中。故煤层气一般指自生自储于煤层中的气体,属于非常规天然气。煤层气的成分多以甲烷为主,故又称为煤层甲烷(coalbed methane,缩写为 CBM)(Rightmire *et al.*, 1984; 张新民等, 1991, 2002; Law and Rice, 1993; Smith and Pallasser, 1996; 陶明信等, 1999; Thielemann *et al.*, 2004)。

在煤矿生产中,一般将煤层及其顶、底板岩层中的气体通称为瓦斯(gas)。由于瓦斯突出、瓦斯爆炸和瓦斯窒息在煤矿生产中造成巨大的生命与财产损失,危害性极大,是煤矿中的主要地质灾害,因此,煤层气曾长期被简单地视为有害气体,相关的研究主要是围绕瓦斯灾害的防治问题,而有关煤层气地球化学,特别是同位素地球化学方面的研究工作很少(陶明信等, 1992; 陶明信, 2005)。

随着上世纪 70 年代发生能源危机,煤层气才被作为潜在的资源看待。美国能源部(DOE)设立了“非常规天然气回收项目”(Unconventional Gas Recovery Program),对泥盆纪页岩、致密含气砂岩和煤储层中的天然气(即煤层气)资源的潜在产能进行研究与评估。“煤层甲烷回收项目”(MRCP)是其中的一个子题。1979 年到 1982 年期间,地质学家对美国 13 个盆地的煤层甲烷资源进行了研究,接着在黑勇士、(中、北)阿巴拉契亚、圣胡安、皮申斯等盆地开展了煤层气勘探和开发试验。在此基础上,美国石油地质学家联合会(AAPG)于 1984 年出版了由 C. T. Rightmire 等主编的第一部大型煤层气研究专著,《Coalbed Methane Resources of the United States》。该书对(北、中)阿巴拉契亚、黑勇士、圣胡安、皮申斯等 13 个含煤盆地的地质、煤和煤层甲烷资源进行了分析研究与评价。1993 年,美国石油地质学家联合会(AAPG)又出版了由 B E. Law 和 D D. Rice 主编的专著《Hydrocarbons from Coal》,对含煤层气盆地的地质及煤层气的地球化学组成等问题以及煤层气开发技术等方面进行了研究与总结。自此之后,又陆续出版了一系列煤层气方面的专著或文集,特别是发表了大量的有关煤层气的研究论文,散布在各种期刊和会议文集中。

(二) 煤层气资源与勘探开发概况

煤层气的资源潜力巨大。据有关方面的估算资料,全世界煤层气的总资源量约为

表 1.1 全球煤层气资源量(据 Law *et al.*, 1993)

国家或地区	资源量/Tcf
中国	700~2800
原苏联	1500~2800
澳大利亚	350
美国	400
加拿大	500~2600
波兰	50
欧洲	250
南非	140
非洲	100
总计	3990~9490

3990~9490Tcf^①(万亿立方英尺),其中主要的分布国家或地区及其资源量为:原苏联,1500~2800Tcf;中国,700~2800Tcf;加拿大,500~2600Tcf;美国,400Tcf;澳大利亚,350Tcf,欧洲,250Tcf(表 1.1)。

美国率先在黑勇士(Warrior)、圣胡安(San Juan)和皮申斯(Piceance)等盆地开展了煤层气勘探开发试验,在较短的时间内取得了重大突破,成功地实现了商业性生产,并自 80 年代起,形成了一个新兴的煤层气产业。

美国的煤层气产量在 1991 年为 $88.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1993 年超过 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1995 年增长到 $275 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1998 年达到 $340 \times 10^8 \text{ m}^3$ (Rightmire *et al.*, 1984; Law and Rice, 1993; Scott *et al.*, 1994, 1995; 陶明信等, 1999), 2000 年为 $340 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2006 年达到 $540 \times 10^8 \text{ m}^3$ (张新民等, 2010)。

美国煤层气勘探开发的成功范例,证明煤层气是一种可进行大规模地面开采的新的洁净能源和优质化工原料。而美国 MRCP 项目所达到的主要目标之一就是引起了油气工业界对煤层气资源的兴趣。

由于煤层气的研究与开发具有资源利用、煤矿减灾和环境保护三方面的重大意义,引起了世界能源界的高度重视。澳大利亚、加拿大、英国、波兰、德国、土耳其等许多国家相继开展煤层气研究与开发实验。例如,加拿大的煤层气产量在 2004 年约为 $15.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2007 年达到 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$; 澳大利亚的煤层气产量在 2006 年为 $18 \times 10^8 \text{ m}^3$ (刘贻军, 2004; 宫诚, 2005; 张新民等, 2010)。近年来,煤层气的勘探开发在全球范围获得了进一步的发展。

(三) 中国煤层气勘探开发及地质研究概况

中国从上世纪 80 年代中后期起,积极开展煤层气研究与开发试验工作。《中国 21 世纪议程——人口、环境与发展白皮书》(1994)制定了“开发利用煤层甲烷资源,加强煤层甲烷资源评价,引进井下开发或地面直接开采煤层甲烷和甲烷利用技术,控制煤矿向大气排入温室气体”的行动计划。这是“中国政府履行国际公约,承担相应国际义务的重要方面,也是促进中国以煤为主的能源系统向环境无害的可持续的模式转变的战略组成部分”(《中国 21 世纪议程》编写组, 1994)。

从国际及国内煤层气的研究概况看,主要侧重于应用性地质问题(如煤层含气量、煤层物性、裂隙系统和水动力条件等)和开发技术与工艺方面。相比之下,煤层气的基础地质与地球化学基础理论研究薄弱。学术界曾较普遍地认为,除开发技术方面的原因外,中国煤层气的地质构造条件复杂而相关的基础地质地球化学研究工作又相当薄弱是影响中

① 1Tcf=2.831685×10¹⁰ m³

国煤层气勘探开发的主要原因之一。因此,加强并深入进行煤层气基础理论研究,是我国煤层气勘探开发与实现规模性生产的需要与基础所在。

我国在“九五”科技攻关、973 计划以及有关的专项中也先后设立了有关煤层气的项目。与此同时,在中国的许多地区先后开展了煤层气勘探开发试验工作。我国煤层气领域的研究取得了显著进展,先后出版了一大批专著、译著,发表了一系列论文。近若干年来,国家 973 煤层气项目的阶段性研究成果较集中的发表在《科学通报》(2005,增刊)、《天然气工业》(2005,1 期)和《地质学报》(2008,10 期)等刊物上,此处不再赘述。

据张新民等(2002,2010)预测,中国煤层气的资源量约为 $31.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$;通过进一步的研究工作,特别是经过研究并补充褐煤区的煤层气资源量,获得中国陆上埋深在 2000m 以浅范围的煤层气资源量为 $32.86 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中的技术可采资源量为 $13.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

另据报道,经全国资源评价,我国煤层埋深 2000m 以浅的含煤层气面积为 $41.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,煤层气总资源量达 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中煤层气资源量大于 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的含煤盆地有 8 个,其总资源量达 $28.01 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表 1.2,赵庆波、田文广,2008)。这 8 个盆地的煤层气资源量占到该总资源量的约 76%,故应为我国最具勘探潜力的盆地。

表 1.2 中国主要含煤层气盆地及资源量(据赵庆波、田文广,2008)

盆 地	含气面积 / 10^8 km^2	时 代	资源量 / 10^{12} m^3
伊 犁	0.60	J	1.21
吐 哈	0.94	J ₂	1.24
		J ₁	0.88
鄂尔多斯	10.18	J	3.90
		C—T	5.92
滇黔桂	1.61	P—T	3.47
准噶尔	2.17	J ₂	2.43
		J ₁	1.44
海拉尔	1.17	J	1.59
二 连	3.48	J	1.96
沁 水	2.68	P ₁	1.58
		C ₂	2.39
合 计	22.83		28.01

上世纪 90 年代初,我国开始进行煤层气地面勘探开发试验,先后在许多地区开展了勘探开发工作,主要集中在华北(晋陕)、东北、云贵及新疆等地区。其中在山西河东柳林地区于 90 年代中期建成了由 7 口井组成的小型井网,对石炭-二叠系煤层气进行了排采试验。其后又在山西沁水盆地内的潘庄、樊庄、枣园以及陕西韩城等地区先后建成了小型井网,进行了煤层气排采试验。

辽宁阜新盆地刘家区块被认为是目前我国煤层气开发效果最好的区块之一。该区发育白垩纪煤系,主要为长焰煤。2007 年时,已在该区块钻井 30 余口,投产 25 口井,日产

气 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累计产气 $3700 \times 10^4 \text{ m}^3$ (赵庆波、田文广, 2008)。阜新刘家地区也被认为是我国率先实现煤层气商业性生产的地区。

山西沁水盆地(晋城地区)是近年来我国煤层气勘探开发最具规模并取得显著进展的地区。沁水盆地发育石炭-二叠纪煤系, 主要为高变质的无烟煤。晋煤集团蓝焰煤层气公司、中联煤层气有限责任公司、中国石油天然气股份有限公司和格瑞克能源(国际)公司等多家公司企业先后在沁水盆地开展煤层气勘探开发工作。截至 2007 年 6 月, 盆内钻直井达 1440 口, 多分支水平井 16 口; 探明含气面积 420 km^2 , 探明煤层气地质储量 $861 \times 10^8 \text{ m}^3$, 控制含气面积 549 km^2 , 控制煤层气地质储量 $974 \times 10^8 \text{ m}^3$; 日产气能力达 $111.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ (赵庆波、田文广, 2008)。到 2008 年, 仅蓝焰煤层气公司在晋城寺河区块的煤层气产量就达到 $3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ (张新民等, 2010)。

经过二十多年的努力, 中国的煤层气地面勘探开发试验工作取得了重要进展, 特别是阜新刘家、沁水盆地南部等地区已先后开始产气。

二、煤岩生烃动力学研究进展

目前, 煤层气已成为国内外研究与勘探的热点。煤层气是在成煤及其地质演化过程中的产物。煤是一种由许多类型键组成的、结构复杂的有机质, 它在成烃地质演化过程中, 受地层温度、时间等因素的综合作用, 发生复杂的化学反应, 这些反应可以视为与实验室可控条件下发生的化学反应具有相同的化学动力学性质。因此, 根据具体实际地质背景资料和煤成烃化学动力学实验得到的生烃动力学方程, 就可以进行地质条件下煤热解生烃机制的地球化学模拟和重现, 进而定量、动态地评价煤层气源岩。国内外已经在这方面进行了许多研究工作, 但是大多数仍集中在对成烃动力学模型和参数运用及其对认识成烃特征和成烃机理意义的探讨方面, 对其在烃源岩定量、动态评价方面研究报道较少, 对其单体化合物形成动力学的研究还处于探索之中。

(一) 煤岩生烃反应动力学基础研究

1. 煤岩生烃动力学模型

煤岩生烃过程中, 温度和时间呈互补关系, 这种关系符合化学反应动力学。煤岩生烃动力学基础研究的进展主要表现在生烃动力学模型的选择和模型的标定两个方面。由于人们对煤岩生烃反应规律的认识、实验方法和计算方法的改进以及许多计算机软件的出现, 动力学模型和标定研究在不断地完善和深化。虽然目前提出的有机质成烃动力学模型有总包一级反应模型、串联一级反应模型、有限个平行反应模型和无限个平行反应模型, 但是由于煤作为一种三维大分子网络结构的非均质多聚物, 包含有多种官能团, 多种化学链连接的复杂分子; 热解过程中, 其反应性质及分解断裂化学键的类型不断变化, 成烃反应是一系列平行和串联的单元反应的组合, 因此, 对于煤成烃大都采取了如下两个模型。

(1) 串联一级反应模型

$$dx/dt = A \exp(-E/RT)(1-x) \quad (1.1)$$

式中, t 为反应时间; x 为反应物的浓度; A 为视频率因子; E 为反应物的表观活化能; R 为气体常数; T 为反应温度。

(2) 平行一级反应模型

$$dx_i/dt = A_i \exp(-E_i/RT)(x_{i0} - x_i) \quad (1.2)$$

式中, t 为反应时间; x_i 为 i 反应物的浓度; x_{i0} 为 i 反应物的原始潜量; A_i 为 i 反应的视频率因子; E_i 为 i 反应物的表观活化能; R 为气体常数; T 为反应温度。

刘金钟、唐永春(1998)在研究烃类单分子动力学时提出的模型为

$$x_i(t) = x_{i0}[1 - \exp(-k_i(t))] \quad (1.3)$$

$$k_i = A_i \exp(-E_i/RT) \quad (1.4)$$

式中, x_i 为第 i 个反应在时间 t 时的生成量; x_{i0} 为第 i 个生烃母体的最大潜力; k_i 为反应速率常数; t 为时间; E_i 为活化能; A_i 为频率因子; R 为气体常数; T 为绝对温度。付少英等(2002)利用这一模型研究了鄂尔多斯盆地上古生界煤生成的甲烷和 C_{2-5} 组分的形成动力学。

2. 煤岩生烃动力学模型标定

煤岩生烃动力学模型的标定是煤岩生烃动力学研究的关键,这种标定实质上是确定动力学模型中的活化能(E)和频率因子(A),一般通过实验数据[产烃率(成分)-温度(时间)]来实现。这种标定涉及研究样品、研究对象、模拟实验方法、计算机软件诸因素。

研究样品包括全煤和煤的不同显微组分。例如,卢双舫等研究了煤岩显微组分的成烃动力学,孙旭光等还研究了煤中的基质镜质体成烃动力学。研究对象从煤中的总烃到单分子烃类。模拟实验方法采用了恒速升温热解和等温热解两种。模拟实验体系可分为开放体系和封闭体系。开放体系比较适合描述煤初次裂解生烃过程,并且实验比较经济、快速,实验条件易于控制,是目前标定煤成烃动力学模型使用最为广泛的一种方法;如 Rock-Eval II 型岩石热解仪,常采用恒速($10^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $30^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $40^\circ\text{C}/\text{min}$ 和 $50^\circ\text{C}/\text{min}$)升温热解方法。封闭体系包括无水或有水(高压)热解实验,并且在等温条件下和特别的装置上进行。封闭体系对于存在二次裂解的情况比较适合,但是这种实验热解时间长,分析程序多,实验误差大,数据可靠程度低。

(二) 煤岩生烃动力学应用研究

1. 煤岩生烃特性变化的内在因素认识

利用煤岩生烃动力学参数(如活化能分布特征等)来研究煤岩生烃特性变化的内在因素有了长足的进展。以往通过常规模拟实验研究表明,煤岩显微组分、煤化程度和成煤环境,均影响煤的生烃特性,而煤岩生烃动力学研究揭示了这种影响的内在因素,并且以此评价煤的生油气门限、生油气高峰,计算油气生成量等。