



煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书·

卷 三

宋 岩 张新民 主编

○ 汤达祯 王生维 等著

煤储层物性控制机理 及有利储层预测方法



科学出版社

www.sciencep.com

层气成藏机制及经济开采基础研究丛书·卷三

宋 岩 张新民 主编

煤储层物性控制机理 及有利储层预测方法

汤达祯 王生维 等著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是对国家 973 计划项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”所属课题“煤储层物性控制机理及有利储层预测方法”研究成果的总结。书中重点归纳介绍了该课题研究成果:①以煤储层孔裂隙系统为基本表征内容,构建了煤储层孔隙系统数值化模型,揭示了煤储层中大裂隙系统的发育规律和成因。②从煤储层发育的沉积环境(煤相)、成岩演化、煤化作用、构造应变控制作用等多层次多方面探讨了煤储层成因,为有利煤储层分布预测提供了思路和方法。③提炼了煤储层物性评价指标体系,建立了煤储层物性综合评价模型,力图推进煤储层描述的系统化、规范化、数值化,在此基础上,通过煤储层特别是高煤级煤储层的发育特征研究和典型盆地剖析,总结了有利煤储层区域分布规律。

本书适合于煤层气研究人员和相关专业人员阅读,也可作为大专院校相关专业的教学参考书。

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 孙燕冬/责任校对:陈玉凤

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)

《煤储层物性控制机理及有利储层预测方法》

作者名单

汤达楨	王生维	金振奎	刘大锰	赵永军
杨 光	唐书恒	刘俊来	许 浩	姚艳斌
张松航	陶 树	邵先杰	张尚虎	张 彪
陈贞龙	陈晓智	崔立伟	李 松	吕玉民
赵兴龙	邓春苗	蔡佳丽		

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。

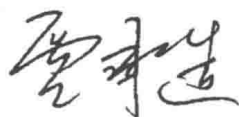
建立符合中国地质特征的煤层气基础理论,为形成中国煤层气产业提供科学技术支撑,是中国科技工作者面临的紧迫任务。经过各方面的共同努力,

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。

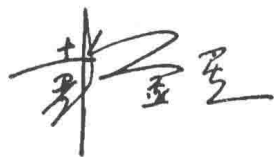
本人有幸加入该项目的跟踪专家行列,从立项到研究启动,一直在关注着

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

本专著是对国家 973 计划项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”所属课题“煤储层物性控制机理及有利储层预测方法”研究成果的总结。

煤层气作为一种洁净、高效的新能源,目前已在美国、加拿大、澳大利亚等国实现了大规模商业性开发。中国煤层气勘探和开发受煤储层地质条件复杂、开发难度较大等因素的严格制约。中国的含煤盆地多具有复杂的演化史和构造变形史,煤的变质作用类型复杂且大多经历过多阶段变质演化与多热源叠加变质作用,煤储层物性差异较大且孔渗性与含气饱和度大多偏低,构成我国煤储层性质的主要缺陷。针对中国煤层气地质条件和特点,在借鉴常规油气和国外煤层气理论的基础上,结合中国煤层气成藏理论研究,开展煤储层物性非均质性、煤储层发育特征及其控制机理、发展低伤害增产技术相关的煤储层理论研究已成为我国煤层气评价选区和勘探开发的当务之急。

煤层气是以煤层作为源岩、储集层和产层的一种非常规天然气。煤储层是一种物性高度非均质的储集层,由有机显微组分、矿物质和各类孔裂隙系统构成。煤中有机质是煤层气的主要来源,煤中孔裂隙系统为煤层气吸附、扩散和运聚提供了场所和通道,直接关系到煤储层的渗透性、含气性、孔隙流体动态等煤层气富集与产出状况。煤储层的精细定量表征和评价是寻找煤层气高产富集区的重要手段,可为煤层气开发技术选择提供基础地质信息,是煤层气勘探和开发过程中一项重要的地质保障技术。开展煤层气储层的精细定量表征和综合评价研究,有利于充分认识我国煤储层特点及煤层气开发潜力,有利于煤层气地面开发高渗富集区的优选,有利于制定有效的煤层气钻完井、排采和开发方案,有利于煤层气产能预测和经济评价,并能为煤储层改造和提高采收率提供理论依据。

课题重点依托沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘煤层气开发示范工程,依照一条主线(煤层气有利储层特征及主要控制因素)、4 个层次(储层表征、成因机理、评价体系、目标预测),力求凝聚研究力量,攻克关键科学问题,根据我国煤储层物性特征,揭示煤储层物性控制因素及其作用机理,为煤层气有利勘探开发目标区块评价预测奠定理论依据,就煤储层孔隙系统及其变质过程演化与数学建模分析、煤储层裂隙发育模型与控制机制、煤储层非均质性发展的沉积成岩作用、煤储层构造应力应变响应、煤储层参数厘定与评价方法、煤储层非均质性区域变化与有利储层分布预测等方面进行了深入探索。本专著着重反映了以下研究成果:

(1) 由裂隙、孔隙构成的煤储层双重体系的结构特征,探讨煤的物质组成、煤储层几何特性、煤的岩石力学性质与煤储层孔裂隙系统为主的物性非均质性之间关系和表现形式,提炼与优化描述参数,构建以解决渗透性预测为主要目的的煤储层物性非均质性的描述理论与模型。

(2) 研究构造形态、沉积层序、煤相构成、煤储层物质组成等因素与煤储层孔裂隙系统的关系,研究不同煤化作用和煤级与高煤级煤的孔渗性能之间的关系;探讨不同的盆地历史和构造变形条件下煤储层孔裂隙系统的发育特征,分析研究区地质背景条件对煤储

层物性非均质性发育方式的控制关系,阐明其形成与分布规律。

(3) 从盆地演化历史角度,综合研究各类地质因素与煤储层孔裂隙系统协调发展历史的机制,探查不同应力和温度条件下煤储层及其围岩岩石力学性质等对煤储层流变特性的控制特征,阐明研究区有利煤储层形成的地质机理,实现有利煤储层分布的有效预测和探测。

全书共分十章,第一章由汤达祯、许浩、张松航、邵先杰、张尚虎、张彪执笔;第二章由王生维执笔;第三章由汤达祯、许浩、张松航、陶树、陈贞龙、陈晓智、崔立伟执笔;第四章由金振奎、汤达祯、张松航执笔;第五章由唐书恒、赵永军执笔;第六章由杨光、刘俊来执笔;第七章和第八章由刘大锰、唐书恒、姚艳斌、李松、吕玉民执笔;第九章和第十章由刘大锰、姚艳斌、赵兴龙、邓春苗、蔡佳丽执笔;最后由汤达祯、王生维编纂成书。

“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目首席科学家、中国石油勘探开发研究院宋岩教授和煤炭科学研究总院西安研究院张新民研究员自始至终精心组织和指导了本课题对科学问题的凝练、技术路线的设计和研究成果的总结。项目专家组特别是本课题跟踪专家唐修义教授和徐永昌教授以极其认真负责的态度全程指导了研究工作。课题参与单位中国地质大学(北京)、中国地质大学(武汉)、中国石油大学(北京)、中国石油大学(东营)、吉林大学等积极支持、提供保障,为课题顺利实施创造了有利条件。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、中国科学院物理研究所、中国矿业大学等协作单位在技术、资料、试验测试等方面给予了热情支持。项目建立各课题间信息共享、交流协作机制对本课题研究任务的完成发挥了重要支撑作用。课题组全体成员谨对各有关单位,各位领导、专家和同仁给予的支持,表示衷心感谢!

目 录

序一	贾承造 (i)
序二	戴金星 (iii)
前言	(v)
第一章 概述	(1)
一、煤储层孔渗性及有利储层表征	(2)
(一) 煤储层微观孔裂隙系统	(2)
(二) 煤储层大裂隙系统	(3)
(三) 煤储层物性地质模型分析	(4)
二、有利储层控制因素与成因机理	(6)
(一) 沉积环境-煤相控制作用	(6)
(二) 煤化作用过程煤储层物性变化	(7)
(三) 煤储层构造应力应变响应	(8)
(四) 煤储层物性发展及其地质因素耦合	(9)
三、储层评价体系与有利储层预测	(10)
第二章 煤储层微观孔裂隙系统	(12)
一、煤储层微观孔裂隙系统的表征	(12)
(一) 煤储层孔隙系统	(12)
(二) 煤储层微裂隙系统	(14)
二、沁水盆地高煤阶煤储层孔裂隙系统	(15)
(一) 孔隙系统发育特征	(15)
(二) 煤储层微裂隙发育特征	(23)
三、鄂尔多斯盆地东缘煤储层孔裂隙系统	(25)
(一) 孔隙系统发育特征	(25)
(二) 煤储层微裂隙发育特征	(32)
第三章 晋城无烟煤储层大裂隙系统	(35)
一、研究区煤层气地质特征	(35)
(一) 地质概况	(35)
(二) 煤层气地质与开发	(41)
二、煤储层大裂隙系统发育特征	(43)
(一) 3号煤储层岩石物理特征	(43)
(二) 3号煤储层节理系统的发育特征	(45)
(三) 3号煤储层的内生裂隙系统发育特征	(47)
(四) 3号煤储层大裂隙系统的方向性和非均一性	(47)
三、煤储层大裂隙系统发育的关键影响因素	(48)

(一) 煤层结构和煤层顶底板的影响	(48)
(二) 煤岩类型和矿物质的影响	(48)
(三) 断层、褶皱构造的影响	(49)
四、大裂隙系统成因模式	(49)
五、煤储层大裂隙系统对煤层气产出的影响	(50)
(一) 煤储层大裂隙系统对成藏的控制	(50)
(二) 煤储层大裂隙系统与煤层瓦斯突出与抽放	(50)
第四章 煤储层物性地质模型分析	(53)
一、煤储层聚类分析	(53)
(一) 理论模型	(53)
(二) 沁水盆地煤储层聚类特征	(54)
(三) 鄂尔多斯盆地煤储层聚类特征	(57)
二、煤储层分形表征	(60)
(一) 分形模型及其意义	(60)
(二) 沁水盆地煤储层分形特征	(78)
(三) 鄂尔多斯盆地东缘煤储层分形特征	(83)
三、储层孔隙系统的物性贡献分析	(88)
(一) 煤储层孔隙结构与储集性关系	(88)
(二) 煤储层孔隙结构与渗透性关系	(89)
四、煤储层非均质性模型	(92)
(一) 分析方法	(92)
(二) 沁水盆地煤储层物性非均质性	(93)
(三) 鄂尔多斯盆地东缘煤储层物性非均质性	(96)
第五章 沉积环境-煤相控制作用	(100)
一、有利煤储层沉积环境	(100)
(一) 地质背景	(100)
(二) 沉积环境对优质煤储层的控制作用	(103)
二、海平面变化对有利煤储层的控制作用	(114)
(一) 海平面变化特征	(114)
(二) 海平面升降对煤储层厚度和分布的控制作用	(116)
(三) 海平面升降对煤储层物性的控制作用	(117)
三、煤相控制作用	(118)
(一) 煤相及其标志	(118)
(二) 煤岩显微组分与煤储层储集物性的关系	(120)
(三) 煤相对煤储层物性的控制作用	(122)
第六章 煤化作用过程煤储层物性变化	(124)
一、煤储层成岩改造作用	(124)
二、煤化作用过程煤储层孔渗性变化	(127)
(一) 煤变质程度与煤孔隙度的关系	(127)

(二) 煤变质程度与煤孔径分布的关系	(129)
(三) 煤变质程度与煤的孔比表面积的关系	(129)
(四) 煤变质程度与煤中割理发育程度及煤层渗透性关系	(130)
三、有利煤储层物性发展及其地质因素耦合分析	(131)
(一) 主要影响因素之间的耦合关系	(131)
(二) 裂隙系统对煤储层渗透性的影响	(132)
(三) 地应力对渗透率的影响	(132)
(四) 埋藏史对煤储层渗透性的影响	(132)
(五) 受热史及成熟度史对煤储层渗透性的影响	(134)
第七章 构造应力应变作用机制	(136)
一、煤岩应力应变实验研究	(136)
二、中高变质煤储层中高温变形机制	(138)
(一) 沁水盆地构造与破裂构造	(138)
(二) 天然煤的组成与结构	(140)
(三) 煤岩宏观力学表现	(141)
(四) 微观与亚微结构	(143)
(五) 煤岩脆-韧性转变变形特征及其控制因素	(145)
(六) 煤岩变形与煤孔隙发育	(146)
三、中低变质煤储层中低温变形机制	(149)
(一) 鄂尔多斯盆地东缘煤变形的区域地质背景	(149)
(二) 低温煤岩强度、变化规律与控制因素	(153)
(三) 煤岩变形的微观表现与变形机制	(155)
四、煤储层物性的应力应变响应	(158)
(一) 沁水盆地煤岩实验变形与其煤岩组成、储层物性的关系	(158)
(二) 鄂尔多斯盆地煤岩实验变形与其煤岩组成、储层物性的关系	(160)
(三) 煤层气有利储层形成的基本力学特征	(161)
(四) 煤岩破裂控制因素与煤储层物性关系	(162)
第八章 有利煤储层主控因素	(164)
一、沁水盆地煤储层差异发育的主控因素	(164)
(一) 控制作用主因子分析	(164)
(二) 煤储层差异发育的主控因素	(166)
二、鄂尔多斯盆地东缘煤储层差异发育的主控因素	(170)
(一) 煤变质控制作用	(170)
(二) 沉积环境对储层物性的控制作用	(172)
第九章 煤储层评价方法与指标体系	(183)
一、煤储层评价理论基础	(183)
(一) 煤储层评价参数	(183)
(二) 评价方法及数学模型	(185)
二、指标体系与评价标准	(188)

(一) 主要参数获取	(188)
(二) 煤储层综合评价因素隶属度	(198)
第十章 有利煤储层分布预测	(211)
一、沁水盆地有利煤储层分布预测	(211)
(一) 单因素评价及结果输出	(211)
(二) 有利煤储层分布	(222)
二、鄂尔多斯盆地东缘有利煤储层分布预测	(228)
(一) 单因素评价及结果输出	(228)
(二) 有利煤储层分布	(233)
参考文献	(236)

第一章 概述

有关煤层气储层物性及其地质控制因素一直是煤层气勘探开发的热点研究领域之一。煤储层物性受到煤的物质组成、煤沉积环境、煤变质作用类型及程度、构造应力场等多种因素的制约。Law (1993)认为割理频率与煤阶存在函数关系,割理频率从褐煤到中等挥发分烟煤随煤阶升高而增大,然后到无烟煤时随煤阶上升而下降。张胜利(1995),张胜利、李宝芳(1996)研究认为,中等变质的光亮煤和半亮煤中割理最发育,这些煤层分布区是煤层气勘探开发的优选靶区。宁正伟、陈霞(1996)经过研究也发现,中等变质程度的煤层内生裂隙最为发育,提高了煤的渗透性和基质孔隙连通性,煤储层物性条件好,在勘探开发过程中易降压,有利于煤层气的解吸、扩散和运移,是最有利于煤层气开发的煤级。毕建军等(2001)通过研究认为,割理的密度主要取决于煤级,一般在镜质组反射率(R^0)为1.3%左右时割理密度最大;割理在高煤级阶段发生闭合主要是次生显微组分的充填和胶合作用所致。杨起、汤达祯(2000)认为,华北石炭-二叠纪煤储层由于经受燕山期持续1亿多年之久的多期多幕岩浆侵入,在快速增温的高温作用下,煤的变质程度增高,煤层也必然再次产气。这种“叠加生烃”作用不仅气量大且成烃速度快,叠加成烃的同时形成大量的“热解气孔”,其孔径远大于深成变质作用下的气孔孔径,从而大大改善了煤储层的渗透性。王生维等(2003)认为,煤储层的孔、裂隙特征主要取决于煤岩成分和煤级。煤岩的有机显微组分和其中的矿物质均受控于煤相,可以通过系统的煤相分析,认识煤储层中煤岩成分、结构、层序等的空间展布特征,为科学预测煤储层的渗透率奠定基础。张建博等(2000)研究发现,沁水盆地下二叠统山西组主煤储层试井渗透率与现代构造应力场最大主应力差之间存在指数正相关关系,最大主应力差越高,越表明其具备形成煤储层裂隙拉张的构造应力条件。构造应力控制煤储层渗透率高低的实质,是通过对天然裂隙开合程度的控制而施加影响。秦勇等(2006)研究认为,地质构造是决定煤层气地质条件和开采条件的根本性因素。例如,构造挤压区以及逆冲推覆作用强烈的地区、不同方向断裂的结合部位,是构造应力集中带,低渗透率煤储层往往较为发育;在构造应力松弛和构造转折端,地应力通常较低,煤层渗透率往往相对较高。而现代构造应力场最大主应力差的高低,对煤储层现今渗透率的高低起着重要的控制作用。构造应力场对煤储层渗透性控制,涉及煤中裂隙、古构造应力场和现代构造应力场,这三者构成了一个相互关联的时空系统,严格地控制着煤层气在地层空间中的渗流性能。裂隙及其网络系统是煤层气渗流的重要通道。成煤后的构造应力,在煤储层中产生大小不等的构造裂隙,为煤层气渗流场形成提供了空间条件。一般认为,区域应力场产生区域性的裂隙系统,控制着煤储层渗透性区域性分布,而局部构造地带的应力集中和差异分布,则是渗透性在不同区块存在差异的重要原因之一。成煤演化过程中由内凝聚应力产生的内生裂隙,在后期构造应力作用下,作为煤岩体中的破裂界面,易形成应力集中,使其衍生为构造裂隙。所以,研究古构造应力场的意义在于深入了解煤岩层中构造裂隙的区域分布规律。

在煤储层孔裂隙系统的定量评价方面,Karacan 和 Okandan (2001)采用 X 射线 CT 成像技术(X-ray computer tomography,X-CT)研究了煤层气在煤的微观结构中的吸附和传输特征;Pitman 等(2003)和 Solano-Acosta 等(2008)通过对煤中矿物的碳、氧同位素的 X 射线衍射研究,分别分析了美国黑勇士盆地和印第安纳宾夕法尼亚煤中割理发育特征及其成因特征;Ortega 等(2006)在研究碳酸盐岩储层中裂隙时,提出了一种新的基于不同尺度的裂隙密度和裂隙宽度精细定量描述方法;Mazumder 等(2006)应用 X 射线计算机层析技术分析割理和节理的发育特征;Karl-Heinz 等(2008)首次采用 CT 扫描成像分析技术研究了煤中割理的发育特征,结果证明这种方法的拟合效果与实际割理的发育方位和密度具有高度一致性。在储层物性的非均质性表征方面,Fu 等(2005)提出了煤中孔隙的分形分类方法,他们根据压汞实验的数据分析,按照孔隙在不同孔径段的分形特征将煤中孔隙分为小于 65nm 的扩散孔隙和大于 65nm 的渗流孔隙两极。至于先进的非常规试分析手段,特别是一些无损检测手段的应用方面,主要采用了恒速压汞技术、低场核磁共振技术和定量 X 射线 CT 扫描成像技术等。作为目前国内外低渗透油气储层研究和评价的最先进的手段,低场核磁共振技术和恒速压汞技术已在我国辽河、吉林等油田常规油气储层研究中取得了良好的应用效果。低场核磁共振技术可快速检测岩石孔隙度、渗透率、含油饱和度和可动流体等物性参数,而恒速压汞技术可从细微角度揭示储层孔隙和喉道分布的详细信息。唐巨鹏等(2005)首次将这种技术引入煤储层的研究,将三轴渗透仪置于核磁共振成像仪中进行了煤层气解吸渗流特性分析,得到了新的煤层气解吸特性、渗流特性与有效应力间关系的实验结论。

本书在课题研究的基础上,就煤储层孔隙系统及其变质过程演化与数学建模分析、煤储层裂隙发育模型与控制机制、煤储层非均质性发展的沉积成岩作用、煤储层构造应力应变响应、高煤级煤储层参数厘定与评价方法、煤储层非均质性区域变化与有利储层分布预测等方面取得的进展和成果进行了系统总结。

一、煤储层孔渗性及有利储层表征

以沁水盆地、鄂尔多斯盆地为主要研究区,在基础地质(包括区域地层、区域构造、构造作用及应力场、热演化史、沉积环境与沉积相、煤层、煤质、煤岩、煤化作用等)研究基础上,广泛收集地质勘探与开发试验积累的煤储层研究成果资料,选择晋城、大宁-吉县、河曲、柳林、乡宁、韩城等煤区进行深入细致的解剖分析,对孔裂隙系统发育特征及其地质环境地质控制因素获得创新认识。

(一) 煤储层微观孔裂隙系统

煤层气储层是由孔隙、裂隙组成的双重结构系统,由一系列裂隙切割成规则的含微孔隙的基质块体,煤中的基质孔隙,是吸附态和游离态煤层气的主要储集场所,煤的天然裂隙系统是煤中流体渗透的主要通道。

显微层次上,沁水盆地高煤级煤中常见孔隙是原生孔,其中以胞腔中空的结构镜质体、丝质体、半丝质体为主,其次为屑间孔。所见矿物质孔属晶间孔,主要由成簇分布的黄

铁矿晶体搭建而成。在发育高度镶嵌结构的研究样品中仍可见到开放的孔隙。值得注意的是,气孔在沁水盆地高煤级煤储层中分布普遍,是煤化过程生气和聚气作用而形成的孔隙,与燕山期异常地热背景下煤级增高、煤层快速生烃相关,气孔甚至呈现膨胀爆裂特征,有时与微裂隙贯通。沁水盆地煤的实测孔隙度范围 0.90%~10.90%,平均 3.345%,总体较低。从油气运移的角度,当孔隙度达 10% 以上时,油气运移有利。当孔隙度在 10% 以下或更低时,油气运移困难。沁水盆地煤储层孔隙度偏低是高变质煤储层固有的缺陷。压汞测试反映直径范围 72~50000nm 的孔隙分布,包括部分小孔、全部中孔以及部分大孔。沁水盆地煤孔隙分布总体特征是微孔—过渡孔(0~200nm)发育,占孔隙 80% 以上,而大孔和中孔(孔径>200nm)不发育,造成渗透瓶颈,致使渗透性普遍偏差。

鄂尔多斯盆地东缘煤储层孔隙结构变化随煤化程度变化明显, R^0 为 0.60%~1.90%,煤储层孔隙度分阶段逐渐降低。煤储层视孔隙度 2.55%~8.43%,平均 4.83%,显示孔隙度偏低;平面上,自北向南随煤阶增高视孔隙度总体呈明显降低趋势。煤储层孔隙以小孔、微孔含量为主,尤以小孔含量占优,其孔隙体积百分含量在 26.06%~66.78%,均值为 48.75%,微孔变化于 14.89%~39.39%,平均为 27.47%;大孔次之,介于 5.56%~20.88%,均值为 16.43%;中孔最弱,变化于 2.35%~13.67%,平均为 7.33%。不同地区不同层位,煤储层孔隙分布变化较大。研究区北部太原组大孔、中孔的发育优于山西组;研究区中部中孔发育弱,孔隙含量一般小于 10%,大孔较发育,介于 20%~40%;南部韩城、澄合、铜川地区中孔含量亦多小于 10%,大孔的发育山西组优于太原组。平面上,山西组煤储层自北向南大孔含量呈增加趋势,中孔含量变化不大,小微孔含量呈减少趋势;太原组煤储层自北向南大孔均呈增加趋势,中部柳林地区明显为高值异常区,究其原因与该地区变质气孔发育有关,中孔、小孔发育减弱。

(二) 煤储层大裂隙系统

煤储层大裂隙系统是指不包括断层在内的,在自然条件下肉眼可以识别的裂隙系统。它由内生裂隙系统、气胀节理系统和外生节理系统三部分组成,规模通常为几毫米到几米。本研究所提出的煤储层大裂隙系统概念既要区分煤储层内部的各种裂缝类型,更强调各种裂隙之间的空间关系,特别是对煤层气渗透的作用。

晋城成庄矿区煤储层中的气胀节理系统发育良好,其产状与内生裂隙的产状一致,气胀节理缝具有近乎等间距的特征,其宽度通常是内生裂隙缝的 2 倍左右,而高度通常是内生裂隙缝的 3~10 倍。气胀节理面光滑平直,具有纯张节理的特征。通常,气胀节理在半亮煤中最为发育;其次是半暗煤及其过渡类型;在光亮煤和暗淡煤分层中,发育较差或不明显。

煤储层中的外生节理按规模可以分为两类:一类是切穿煤层进入煤层顶底板的外生节理,另一类是切穿整个或大部分煤层但不切穿煤层顶底板的外生节理,其中后者占 90% 以上。在成庄矿 3 号煤储层中,外生节理密集带具有近乎等间距发育的特点。在 1~5m 的外生节理密集带内,通常发育 2~5 条切穿整个煤层的节理。节理缝内有厚度不等的构造煤,裂隙缝内有多期次方解石脉充填物,说明这些节理缝是内、外流体交换的主要通道。