



煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书·卷一

宋岩 张新民 主编

○ 宋岩 张新民 等著

煤层气成藏机制及 经济开采理论基础



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·卷一

宋 岩 张新民 主编

煤层气成藏机制及经济开采 理论基础

宋 岩 张新民 等著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是目前我国比较全面论述煤层气成藏机理和勘探开发技术最新进展的一部文集,共收录论文 41 篇。文集内容涉及到煤层气勘探和开采领域。在勘探理论研究方面包括煤层气的生烃动力学;煤储层非均质性控制因素、吸附理论进展;煤层气的保存与破坏;构造、沉积、水动力条件、热动力条件对煤层气成藏的影响;煤层气成藏的主控因素;煤层气资源评价与预测等。在煤层气勘探技术方面有煤层气高分辨率测井技术、三维三分量技术等。在煤层气勘探中的应用。在煤层气开采研究与技术应用方面有流固耦合渗流、渗流动力场、煤储层孔渗变化规律研究以及定向羽状井、水力压裂和采出水处理等应用技术。各篇论文自成体系,方便不同专业读者阅读。

本书适合煤层气研究人员和相关专业人员阅读。

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 刘卓澄/责任校对:刘小梅

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 2000 m 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、沁水柿庄等 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。

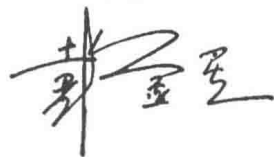
本人有幸加入该项目的跟踪专家行列,从立项到研究启动,一直在关注着

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

煤层气是赋存于煤层及其围岩之中的一种自生自储式非常规天然气。它是一种新型的洁净能源和优质化工原料,是我国在 21 世纪的重要接替能源之一。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。

从国家重大需求出发,中国石油天然气集团公司和煤炭科学研究总院共同组织申报国家重点基础研究发展规划(973)项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”,该项目于 2002 年由国家科技部正式批复。项目依托部门是中国石油天然气集团公司,首席科学家是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分院张新民研究员。

项目的正式立项体现了国家对我国煤层气产业和煤矿安全的高度重视,首席科学家接到批文后,也深感责任的重大,决心以最佳的姿态、组织最好的团队,不辜负国家的期望,力争向国家交上一份满意的答卷。因此,项目立项后,首席科学家首先组建了一支包括中国石油勘探开发研究院及廊坊分院、煤炭科学研究总院西安分院、中联煤层气有限责任公司、中国矿业大学、中国地质大学等多个部门的技术骨干组成的研究队伍。成立了项目跟踪专家组,组长为贾承造院士,成员主要有戴金星院士、范维唐院士、郭尚平院士、沈平平教授、王慎言教授、赵文智教授、贝丰教授、徐永昌教授、成玉琪教授、唐修义教授、刘雯林教授、钱凯教授。在此基础上,国家科技部为了保证项目的顺利实施,还专门指派了国家科技部领域咨询专家黄素逸教授和周凤起研究员对项目进行全面跟踪。项目于 2003 年 3 月 8 日召开了启动大会,刘光鼎、欧阳自远、戴金星、范维唐、汪集旸、翟光明、胡见义、李德生、郭尚平、韩大匡等院士及项目跟踪专家、国家科技部基础研究司马燕合副司长、王长锐处长和韩苍穹博士及项目依托部门和有关部门的领导应邀出席了会议。

我国是煤层气资源量比较丰富的国家,自 20 世纪 80 年代以来,将煤层气作为一种资源进行勘探开发利用研究,同时积极引进外国(主要是美国)的现代煤层气开采技术,进行煤层气勘探开发试验。但我国煤层气开发目前仍处于小规模“试生产”阶段,发展速度明显落后于美国,其根本原因在于对煤层气经济资源预测不准和缺少经济适用的开采技术这两大难题。因此,项目针对我国煤层气藏形成的特殊性和勘探开发中存在的问题,围绕四个科学问题:煤层气形成的动力学过程、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,进行五方面的基础理论研究:煤层气形成的动力学过程及资源贡献、煤层的储集性能及控制因素、煤层气的成藏条件及分布规律、中国煤层气经济资源潜力及预测、煤层气经济开采基础理论。项目下设 9 个课题:①煤层气形成的动力学过程及资源贡献;②煤储层物性非均质性及控制机理;③煤层的吸附特征与储气机理;④煤层气藏动力学条件研究;⑤煤层气成藏条件、气藏模式及富集理论研究;⑥中国煤层气经济资源潜力及分布;⑦煤层气藏高分辨率探测的地球物理响应;⑧煤层气藏开采基础理论研究;⑨煤层气经济开采增产机理研究。

项目从申报到正式启动,广大科研人员就着手对国内外煤层气勘探和开采的调研,取

得丰富的成果和新的认识。煤层气项目作为国家一个重点基础研究项目,能够把优秀的研究成果充分反映出来、展现给广大读者,是一件十分必要又意义深远的事情。因此,为了及时反映研究过程中所取得的成果和方便煤层气领域研究人员和相关专业人员的相互交流,首席科学家计划在项目研究期内出版《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》,共11卷。其中卷一主要为各学术骨干调研的论文;卷二至卷十为各课题的有关研究成果;卷十一为项目成果汇总。

《煤层气成藏机制及经济开采理论基础》一书是该套丛书第一卷,主要是项目正式启动前后,广大科研人员对煤层气领域进行国内外调研所取得的新认识。内容涉及到煤层气勘探和开采领域,在勘探理论研究方面包括煤层气的生烃动力学;煤储层非均质性控制因素、双孔隙系统数学模型;煤层吸附理论进展、煤层的等温吸附性、煤层甲烷吸附特征及其控制因素;煤层气的保存与破坏;构造、沉积对煤层气成藏的控制作用,水动力条件对煤层气运移和富集的影响,热动力条件与煤层气的富集;煤层气藏类型与要素、煤层气藏成藏的主控因素;煤层气资源评价与预测等。在煤层气勘探技术方面有煤层气高分辨率测井技术、地震属性技术、三维三分量技术在煤层气勘探中的应用。在煤层气开采研究与技术应用方面有流固耦合渗流研究、煤层气开采过程中的渗流动力场研究、煤储层孔渗变化规律,定向羽状井、水力压裂和采出水处理等应用技术。

《煤层气成藏机制及经济开采理论基础》的出版,凝聚着科研人员辛勤的汗水和跟踪专家的心血。从撰稿到最终定稿,不仅是作者在编写过程中做到极端负责,而且跟踪专家在稿件评审和技术把关中也十分认真和严格,对大部分稿件提出了很多宝贵的意见。根据评审专家提出的修改意见,稿件又返回作者进行了认真的修改,从而保证论文水平和质量都具有较高的起点,使之真正成为一部具有实用价值的文献而奉献给广大读者。

致谢:中国石油股份公司总地质师贾承造院士和中国石油勘探开发研究院戴金星院士在百忙中抽出时间为本书写序;专家组成员不辞辛苦,对稿件作了认真的审阅,并对项目和课题研究工作提出了许多宝贵意见;国家科技部基础研究司张先恩司长、马燕合副司长、崔拓处长、王长锐处长和韩苍穹博士,项目依托部门领导中国石油天然气股份有限公司总地质师贾承造院士,中国石油天然气集团公司科技发展部刘振武局长、方朝亮处长,中国石油天然气股份有限公司科技与信息部刘希俭总经理、罗治斌副总经理、李先奇处长和勘探与生产分公司赵政璋副总经理、刘德来处长及煤炭科学研究总院、中联煤层气有限责任公司、国家教育部科技司、中国科学院资环局等部门的领导自始至终都在关心项目的进展,并对项目给予了大力支持。在此首席科学家代表项目组全体成员对他们所付出的辛苦和热情的指导表示衷心的感谢。

目 录

序一	贾承造(i)
序二	戴金星(iii)
前言	(v)
煤层气成藏地质条件及气藏类型	宋 岩 柳少波 洪 峰(1)
深入开展我国煤层气资源量预测工作	张新民 韩保山(10)
煤岩生烃动力学及其研究进展	段 毅 陶明信 张 辉 张小军(20)
煤层气地球化学特征及其在成藏研究中的意义	
.....	张枝焕 王 青 陶明信 谢光新(27)
煤热演化模拟生烃实验及成果	王彦龙 解光新(36)
煤层气藏保存的地质条件分析	王生维 陈钟惠 张 明 段连秀(41)
山西太原地区晚石炭世—早二叠世海平面升降对煤储层非均质性的控制作用	
.....	金振奎 张响响 赵宽志 刘荣徽(46)
煤储层物性非均质性控制因素分析	刘大锰 汤达祯 唐书恒 姚艳斌(58)
煤储层孔渗性评价方法研究现状	唐书恒 汤达祯 刘大锰(66)
煤层气储层研究的几点设想	杨 光 刘俊来 薛林福 曹成润(72)
煤储层孔隙系统几何模型研究的新进展	刘洪林 王红岩 李贵中 赵国良(76)
煤储层双孔隙系统数学模型初步研究	张尚虎 汤达祯(81)
煤层气储集与三态动平衡	桑树勋 朱炎铭 张 井(90)
煤层甲烷吸附特征及其控制因素研究：现状与问题	
.....	张 泓 钟玲文 张 群 李小彦 崔永君 李贵红(99)
高压气体吸附特征和模型的研究现状	崔永君 张 群 靳秀良 李育辉(108)
煤层气吸附理论研究新进展	崔永君 张 泓 张庆玲 宋孝忠(116)
煤的等温吸附测试方法评述	张庆玲 崔永君 张 群(125)
煤层气地质条件的沉积控制作用	
.....	秦 勇 傅雪海 傅国友 姜 波 韦重韬(132)
构造对煤层气成藏的控制作用	
.....	方爱民 侯泉林 琚宜文 卜英英 卢继霞(140)
煤层气运聚与水文地质关系研究述评	
.....	傅雪海 秦 勇 韩训晓 杨永国 彭金宁(152)
煤层气富集的热动力条件与数值模拟	韦重韬 任战利 孙占学(159)
煤层气藏保存条件研究现状	李贵中 王红岩 刘洪林 刘 萍 杨 泳(165)
中国煤层气富集的主控因素及分布区带讨论	赵孟军 洪 峰(170)
煤层气成藏物理模拟试验技术	王红岩 刘洪林 李贵中 王 勃 刘 建(179)
煤储层压力异常研究进展	苏现波(184)

试论煤层气藏类型及其成藏要素	赵靖舟	时保宏	(192)
中国煤层气聚集单元研究现状	赵靖舟	时保宏	(198)
煤层气资源量计算方法评述	李建武	张培河	郑玉柱(204)
煤层气三维地震勘探 AVO 技术及相关理论研究 ...	彭苏萍	陈信平	陈华靖(215)
煤层气三维三分量地震勘探采集方法研究			
.....	霍全明	程增庆	胡朝元 彭苏萍(222)
地震属性技术及其在煤层气勘探中的应用:回顾与展望			
.....	杨瑞召	彭苏萍	彭晓波 孔 炜(230)
煤层气三维三分量地震勘探资料处理:研究现状与展望			
.....	李国发	彭苏萍	钱 辉 何兵寿 勾精卫(236)
煤层气储层高分辨测井技术及相关理论研究	杜文凤	彭苏萍	杨瑞召(242)
煤层气解吸机理研究现状与进展	张遂安		马东明(248)
流固耦合渗流研究进展	同登科	石丽娜	王永红(253)
煤层气开采过程中煤储层孔渗变化规律综述	胡爱梅	李明宅	李国富(267)
煤层气开采过程中的水动力条件研究	叶建平		吴建光(272)
煤层气渗流研究进展	邓英尔	黄润秋	郭大浩 张遂安(277)
煤层气井水力压裂裂缝扩展研究综述	单学军	张 劲	张士诚(284)
定向羽状水平井开采煤层气的数学模型	张冬丽	江 山	王新海(293)
煤层气采出水的处理方法			潘红磊(305)

煤层气成藏地质条件及气藏类型

宋 岩 柳少波 洪 峰

(中国石油勘探开发研究院实验研究中心,北京 100083)

摘 要 煤层气是一种非常规天然气,储集机理、成藏过程、气藏边界和流体状态有别于常规气藏。煤层气富集成藏应具备“生、储、保”基本地质条件。煤层生气量与煤层气聚集有密切的关系,煤层厚度和分布、变质程度及煤岩组成是控制生气量的主要因素。煤层气藏自生自储的特点决定煤层的储集能力为煤层气是否能富集成藏的关键因素之一,煤储层的基本特征主要表现在煤的孔隙结构特征、渗透性特征和吸附性特征,其特征主要与煤岩组分、变质程度以及所受的构造应力密切相关。煤层气成藏保存条件对煤层气成藏也很重要,主要体现在盖层、水文地质条件和构造条件。在气藏分类上,压力封闭的类型作为煤层气藏一级分类原则,煤层气藏可分为水压封闭煤层气藏和气压封闭煤层气藏。二级分类主要考虑气藏圈闭的形态及圈闭影响因素。

关键词 煤层气 成藏 地质条件 气藏类型

一、煤层气藏的含义

1. 煤层气藏的非常规性

煤层气是一种非常规天然气。所谓非常规,即是因为煤层气在地下的赋存形式和状态不同于常规天然气,主要表现在:

(1) 储集机理不同

常规天然气是以游离状态储集在储层的孔隙空间之中,在气源充足的情况下,其聚集量主要与孔隙空间的大小有关,煤层气则以吸附状态赋存在孔隙内的表面之上^[1-3],其聚集量与煤层的吸附性密切相关^[4-6]。

(2) 成藏过程不同

常规天然气由源岩生成后,经过一定距离的一次运移和二次运移在储层中聚集成藏^[7],天然气运移方向受流体动力场控制,即天然气主要是在浮力和流体压力的驱使下进行运移^[8-9],煤层气由煤源岩生成之后直接被煤储层吸附而聚集,这种聚集不受流体动力场的控制而受温压场的影响^[1,10]。相同的煤质和煤阶的煤,随压力增大含气量增大,随温度升高含气量降低。

(3) 气藏边界不同

常规天然气藏有明显的气藏边界,气藏的范围及边界是由圈闭条件所决定的,并且气

藏内外天然气含气是具有“有”和“无”质的变化;而煤层气藏与常规天然气藏最大的区别之一就是无明显气藏边界,只要有煤层就有煤层气的存在,在某些地质条件下,煤层气相对富集则形成煤层气藏,因此煤层气藏内外只有含气丰度的差别,而不是有气和无气的差别。

(4) 流体状态不同

常规天然气藏和煤层气藏都有气、水两相存在,但二者所处的状态不同:常规天然气藏主体一般是以气相为主,即储层孔隙空间被游离的气相所占据,存在少量束缚水,水主要以边水和底水的形式存在于气藏的底部或边部,具有统一的气水界面;而煤储层大的孔隙空间主体是被水所占据,水中含有一定量的溶解气,部分孔隙中存在游离气相,气藏中的大部分气体是以吸附相存在,约占 80% 以上^[11],即煤层气藏中有吸附气、游离气和溶解气三种存在形式。

2. 煤层气藏的概念

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对煤层气藏赋予了一定涵义和定义。李明潮等^[12]通过煤层气国家科技攻关研究,认为煤层气藏是煤中甲烷在具备适当外界条件时相对集中在一定的围限内,围限内的气体富集程度、压力一般都高于围限之外,也就是说一个煤层气田也可形成一个或多个煤层气藏。钱凯等^[5]通过多年对煤层气勘探开发的实践指出,广义而言,煤层甲烷气藏是指在压力(主要是水压)作用下“圈闭”着一定数量气体的煤岩体。同时对广义的煤层甲烷气藏概念加以限制,提出了有效煤层甲烷气藏或经济煤层甲烷气藏的概念,即指具有商业开采价值的煤层气藏。张新民等^[13]在对全国煤层资源评价的研究过程中,提出了煤层气藏的定义:煤层气藏是指在地层压力(水压和气压)作用下保有一定数量气体的同一含煤层的煤岩体,并且有独立的构造形态。

尽管一些学者用各种术语来描述煤层气藏,但普遍认为煤层气藏不仅难以给出确切的定义,而且在地质空间也难以界定,其原因主要是煤层气藏和非煤层气藏之间没有严格的气藏界限,而是只有富集程度的差别。这种富集程度是受一定的地质条件所控制的,因此,可以认为煤层气藏应该是有边界限定的,只是这种边界在某种情况可以容易确定,如断层侧向封堵时,断层与煤储层的交线即是气藏边界。然而,多数情况气藏边界是一个含气丰度的渐变带,渐变带的形状和宽度受气藏本身特定的成藏主控因素所决定。因此煤层气藏可定义为:保存有相当数量气体并受相似地质因素控制的煤岩体基本地质单元。

二、煤层气成藏的基本地质条件

常规天然气有生、储、盖、运、圈、保基本成藏地质条件,只有在成藏地质条件有利的地区才有望找到规模较大的天然气田。煤层气也有基本成藏地质条件,但这些地质条件与常规天然气相比有着根本的不同。概括起来,煤层气富集成藏应具备“生、储、保”基本地质条件。

1. 气源条件

气源条件是气藏形成的基础,只有气源供给充足才能形成富集程度较高的气藏,这对于常规天然气藏和煤层气藏都是如此,但是常规天然气对气源供给的要求要比煤层气藏高得多。常规天然气藏要求源岩生气强度必须达到一定程度才能形成规模较大的天然气聚集。同样煤层生气量与煤层气聚集也有着密切的关系,而煤层的厚度和分布、变质程度及煤岩组成是控制生气量的主要因素。

(1) 煤层厚度及分布

具有一定变质程度的厚度较大且分布稳定的煤层是煤层气藏形成的资源基础^[14],煤层厚度大,不仅生气量大而且资源丰度高,并且煤层厚度大也有利于煤层气赋存(表1)。

由此可见,一定的煤层厚度是煤层气成藏的前提,张建博等^[15]结合近几年勘探开发试验经验,将煤层厚度下限暂定为1m;钱凯等根据美国试验数据,提出煤层厚度以0.6~5.0m有利于煤层气富集和开发。

(2) 煤变质程度

煤层的生气量和储气能力都受到变质程度影响。作为煤层气藏的气源条件来说,要求煤层必须达到一定的变质程度。煤岩生气热模拟实验表明,在低变质阶段,煤岩的产气量很低,随着变质程度的增高,煤岩的产气量呈数量级增大(图1)。地下实际情况也是如此,例如东北第三系和西北侏罗系煤层含气量普遍较低,这一方面与煤层储气性能有关,更重要的是由于变质程度低而生气条件差。在同一地区,煤岩含气量也是随着煤阶的增高而加大(图1)。

2. 储集条件

鉴于煤层气藏自生自储的特点,煤层的储集能力成为煤层气是否能富集成藏的关键因素之一。储集能力包括对吸附气和游离气两种状态煤层气的储集。煤储层的基本特征主要表现在煤的孔隙结构特征、渗透性特征和吸附性特征,而上述三大储集特征主要与煤岩组分、变质程度以及所受的构造应力密切相关。

(1) 孔隙结构特征

煤层的孔隙结构分为煤层孔隙和裂缝孔隙,构成了煤层的双孔隙系统。孔隙一般是指煤层中的中孔—微孔,煤层的孔隙容积与中孔有关,孔隙比表面积主要与微孔有关,由于煤层气多以吸附气的形式赋存于煤层中,吸附量与微孔的表面积有关,所以微孔的发育,使煤的孔隙表面积增大,1克煤的表面积可达100~400m²。因此,尽管煤储层孔隙很小,但储气能力并不比常规砂岩差。煤储层的大孔主要由裂缝构成,又称为割理,主要是煤化作用引起,局部也可由局部构造应力引起。煤层一般发育有两组相互垂直的割理,面割理和端割理,这两组割理将煤体分割成一个个长斜方形的基岩块体,煤层的割理密度比砂泥岩的节理要大,从而使其具有较好的储渗性能。

表 1 国内外主要煤层气田煤层厚度统计表

盆 地	区 块	煤层时代	煤 号	厚度/m
圣胡安		K		$\frac{<0.6 \sim 12>}{(6.3)}$
黑勇士		C (宾夕法尼亚系)		$\frac{<0.6 \sim 2.4>}{(1.5)}$
粉河		古新统		$\frac{[12 \sim 30]}{[24]}$
拉顿		K		$\frac{[5 \sim 15]}{[10]}$
沁水	晋城	P ₁	3	$\frac{<4.1 \sim 6.5>}{<5.59>}$
		C ₃	15	$\frac{<1.5 \sim 5>}{<3.3>}$
	潞安	P ₁	3	$\frac{<4.5 \sim 8.4>}{<6.3>}$
		C ₃	15	$\frac{<4 \sim 8>}{(6)}$
	阳泉	P ₁	3	$\frac{<1 \sim 3>}{(2)}$
		C ₃	15	$\frac{<3 \sim 6>}{(4.5)}$
鄂尔多斯	吴堡	P ₁	5	$\frac{<3 \sim 5>}{(4)}$
		C ₃	8	$\frac{<7 \sim 10>}{(8.5)}$
	三交-石楼	P ₁ -C ₃	5,8	$\frac{[8 \sim 20]}{[16]}$
	大宁-吉县	P ₁	5	$\frac{<3 \sim 7.5>}{(5.25)}$
		C ₃	8	$\frac{<3 \sim 8.8>}{(5.9)}$
	韩城	P ₁	3	$\frac{<1.4 \sim 14.83>}{<4 \sim 6.5>}$
铁法		J ₃ (阜新组)	上煤组 (4,7)	$\frac{<3.3 \sim 8.5>}{(5.9)}$
			下煤组 (15,16)	$\frac{<2.8 \sim 7.3>}{(5.1)}$
六盘水		P ₂ (龙潭组)		$\frac{<1.2 \sim 6.7>}{<2 \sim 3>}$
淮南		P	C ₁₃	$\frac{<6 \sim 10>}{(8)}$

注:()代表是中值; []代表可采煤厚度, 分母为均值; <>为主煤层单层厚度, 分母为均值。

煤储层孔隙度同样反映出其储集能力, 孔隙度是煤孔隙占煤总体积的百分比。目前研究表明, 煤储层的孔隙度与煤阶关系比较密切, 在泥炭阶段时, 煤孔隙度可达 75%, 到中挥发分烟煤时, 煤孔隙度只有百分之几甚至更小, 再到无烟煤, 孔隙度又增大^[5,13]。张

建博等对我国不同变质煤阶煤的孔隙度值统计,肥煤—贫煤孔隙度较小,孔隙度 2% ~ 4%,而在褐煤—气煤,无烟煤孔隙度又增大,一般在 4% ~ 10%。

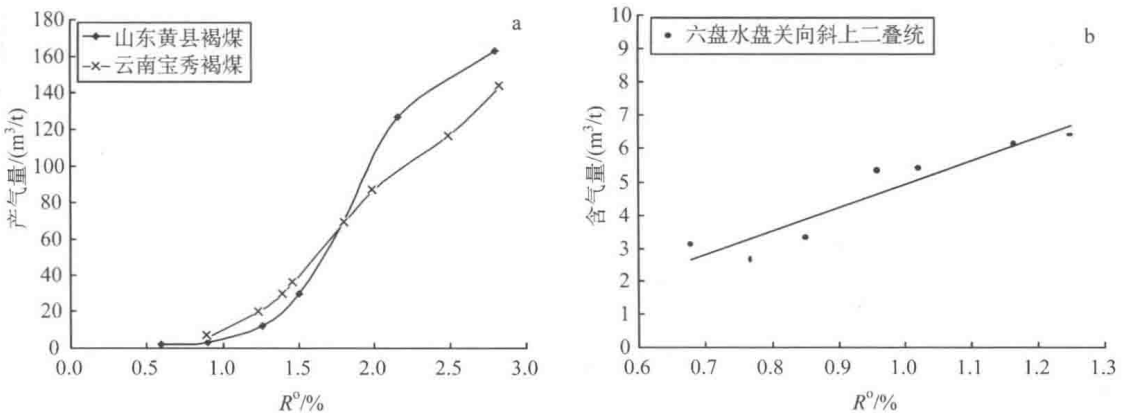


图1 生气量和含气量与煤岩变质程度的关系
a. 煤岩热模拟实验; b. 地区实测

(2) 渗透性特征

煤储层的渗透性直接影响煤层气产量的高低,煤层的渗透性受到煤层割理发育的影响,由于煤层的各向异性,面割理的方向一般渗透率比较大,端割理方向一般比较小。煤层的渗透率一般很低,我国煤层气储层渗透率普遍小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,就是产能比较高的井,其渗透率也不会很高,如晋城潘 2 井、晋试 1 井 3 号煤层日产气量分别为 6160m^3 和 4050m^3 ,而渗透率只有 $1.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。煤层的渗透性随煤层的埋藏深度增大而变低,同时受地质构造影响也比较大,一般发育于构造断裂带和紧密褶皱区的煤层渗透性好,如国外勇士盆地、圣湖安盆地煤层气田在断层带附近具有较高的产量,沁水盆地南部经受过多期不同构造应力叠加,是裂缝发育有利区,这可能是煤层气得以成藏的原因之一。

(3) 吸附性特征

煤层气基本以吸附气的形式赋在煤层中,因此煤所具有的吸附性是煤层气藏的一个比较重要的特点。煤层所具有的吸附作用主要为物理吸附,其吸附能力取决于煤的兰氏体积,具有高兰氏体积的煤体更有利于煤层气的吸附。而影响煤层吸附能力的因素是多方面的,内在的因素有煤岩类型、煤的变质程度、微孔隙,外在的因素有温度、压力、气体组分和煤的含水性等。研究表明,在相同温度压力条件下,煤的吸附量随着煤的变质程度增加而增大,这点在国内外含煤盆地的煤岩吸附性实验都得到说明,如美国皮申斯盆地红山单元 1DS32 - 2 井中卡米奥煤层的含量气与 R° 成正比, R° 为 1.19% 时含气量为 $7.48\text{m}^3/\text{t}$, R° 为 1.27% 时含气量达到了 $11.86\text{m}^3/\text{t}$,我国不同煤阶的煤其吸附常数,从褐煤至无烟煤,兰氏体积是逐渐增大的,从 $12.17\text{cm}^3/\text{g}$ 到 $43.49\text{cm}^3/\text{g}$ ^[15],沁水盆地在晋城、阳泉等地区高煤阶煤吸附量比霍州、古交等地区低煤阶煤具有更高的吸附量,如晋城 R° 为 5.29% 的煤岩等温吸附 5 ~ 15MPa 压力下吸附量为 $35 \sim 40\text{m}^3/\text{t}$,而霍州 R° 为 0.95%

的煤岩在相同温压下吸附量只有 $10 \sim 15\text{m}^3/\text{t}$ 。此外,温度、压力、含水等对煤层的吸附性也有明显的影响,高压、低温和煤岩含水量小有利于煤层气的吸附。

由上可见,煤层气藏的储层含气量受到多种因素的影响,在评价煤层气储集条件时要全面考虑,才能较客观地评价出较有利的储集层。

3. 保存条件

煤层气大部分以吸附气的形式存在于煤层中,这就涉及到了煤层气藏要不要好的保存条件的问题。从目前煤层含气量与保存条件关系分析可见,保存条件对煤层气成藏也是重要的,主要体现在盖层、水文地质条件和构造条件。

(1) 盖层

盖层对常规气藏的保存相当重要,是因为常规气藏天然气主要是以游离气和水溶气的形式赋存。而煤层气尽管多数为吸附态气体,但仍存在少量的游离气和水溶气。这三者在煤层中也存在平衡状态,有较多的游离气被保存下来同样对维持煤层气的最大吸附量有重要的作用,因此盖层对煤层气的保存虽然没有常规气藏那样直接和明显,但也是煤层气藏保存的主要因素之一。如我国沁水盆地晋试1井、晋试4井3号煤层含气量高于 $25\text{m}^3/\text{t}$,主要得益于其上覆有稳定的一套泥岩,厚度达 $50 \sim 70\text{m}$;而晋试3井3号煤层上覆盖层则主要是砂、泥岩互层为主,盖层厚度仅 20m ,其含气量却明显比晋试1井、晋试4井要低,为 $17.1\text{m}^3/\text{t}$ 。

从煤层自生自储的特点上看,煤层要有足够大的含气量,除了上覆有较好的盖层以外,下伏的盖层也是重要的,理论上煤层气藏最理想的保存条件是煤层处于一个封闭体系中。如果上覆盖层好,而其下是一套渗透性岩层,则煤层生成的气体由于烃浓度差的作用而往下伏渗透层扩散,使煤层气散失而影响到煤层气的吸附量。目前在我国煤层气区如沁水盆地南部、鄂尔多斯大宁地区等,明显存在同一煤层相近深度条件下煤层气顶底板岩性不同而导致含气量差异的现象(图2、图3)。

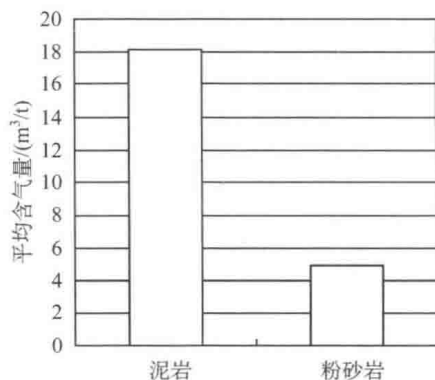


图2 沁水盆地3号煤层顶板岩性与含气量

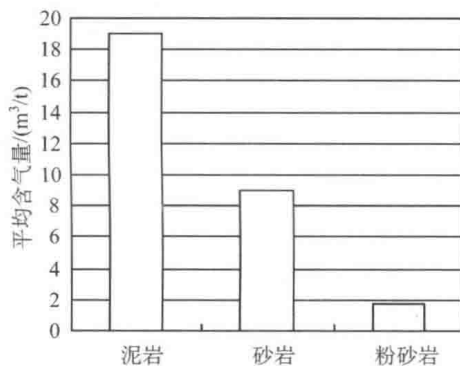


图3 沁水盆地3号煤层底板岩性与含气量

(2) 水文地质条件

煤层所处的水文地质条件的不同,也可造成含气量的差异。这主要是因为从煤层本