

煤层气地质研究进展与趋势

汤达祯¹, 秦 勇², 胡爱梅³

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008; 3. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 煤层气地质研究正面临以下挑战: a) 煤层气成藏的地质过程与动力学机制研究, 以揭示生气性和储气性的协调发展关系, 查明复杂地质条件下煤层气藏的形成机理、成藏类型和分布规律; b) 煤层气储集系统与聚散机制研究, 以剖析煤- 水- 气的耦合关系与煤的储层特性共同制约煤层气的扩散、渗流、运移、逸失和聚集的过程; c) 煤层气藏经济高效开发的场效应研究, 以探讨地球物理场和地球化学场与人工改造、强化开采间的互动机制, 有效预测煤层气的勘探开发效果。

关键词: 聚散过程; 场效应; 成藏作用; 煤层气

中图分类号: TE132. 2

文献标识码: A

煤层气是赋存于煤层中的自生自储式非常规天

利用我国丰富的煤层气资源, 不仅能够大幅度增加

我国煤层气资源潜力巨大, 埋深 2 000m 以下的资源总量达 $30 \times 10^{12} \sim 35 \times 10^{12} \text{m}^3$, 与常规天然气资源量相当, 约占世界煤层气总资源量的 13%, 居世界第二位^[1], 与我国陆上常规天然气资源量相当。在全国 21 个大气田中, 16 个为煤成气气田, 煤成气大气田占到全国大气田总储量的 86. 86%, 同时是全

少, 还可持续发展的重大战略举措。

煤层气藏的形成机制和开发原理与常规天然气截然不同。我国埋深 2 000m 以浅的、吨煤含气量大于 4m^3 的潜在可采煤层气资源量, 94% 集中在贺兰山- 龙门山以东的中国东部地区, 并主要赋存于上古生界煤储层中。我国经历多期构造运动, 盆地复

势在必行。我国煤层气资源探明程度低, 经认证的储量不足全国总量的 0. 01%, 煤层气地面勘探开发刚刚起步, 成藏机理不明确, 开发工艺技术不成熟, 煤层气产业尚未形成。进入 21 世纪后, 我国能源状况十分严峻, 能源供需矛盾直接威胁到国家的能源安全, 燃煤造成的环境压力也要求目前国内煤炭占绝对优势比例的畸形能源结构必须得到改善。开发

的地质历史, 造成我国“三低一高”的煤层气地质背景, 即煤储层含气非均质性高, 而渗透性、储层压力和含气饱和度偏低。围绕煤层气成藏动力学、规律、条件、类型以及煤储层增渗卸压的岩石力学机理的关键科学问题, 查明不同地质时期控气因素的配置关系, 探讨各类地质场的互动过程, 研究煤、水、气耦合的实质, 弄清煤层气的成藏机制和分布规律, 是

收稿日期: 2003- 10- 23.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB21170); 高校博士学科点专项科研基金项目(20020491003).

作者简介: 汤达祯(1957-), 男(汉族), 安徽合肥人, 博士、教授、博士生导师, 主要从事煤、油气地质的教学与科研工作。

实现我国煤层气经济高效开发的必由之路。

2 煤层气地质研究现状与发展趋势

2.1 国外煤层气地质研究进展

煤层气开发包括地面垂直井排采和矿井下抽放两条基本途径。1976年,美国第一口商业性煤层气井成功投产。80年代初,美国在与西部落基山造山带和东部阿巴拉契亚造山带相关的13个含煤盆地群中启动了煤层气成藏条件研究,引发了对于“排水—降压—解吸—扩散—渗流”煤层气产出机制认识的突破^[2]。经过理论与勘探开发实践,提出了北美西部落基山脉高产走廊的煤层气成藏模式,形成了以煤储层双孔隙导流、中煤级煤生储优势与成藏优势、低渗极限与高煤级煤产气缺陷、多井干扰、煤储层数值模拟等为核心的煤层气勘探开发理论体系^[3,4]。20世纪90年代,美国又提出“生物型或次生煤层气成藏”理论^[5],并于1998年在粉河褐煤盆地成功实现了低煤级煤的煤层气商业性开发。正是一系列重大基础研究,带动了美国煤层气产业的崛起。

目前,澳、加、德、英、波、印、俄等30多个重要产煤国家或地区都启动了煤层气的研究与发展计划。加拿大与美国地质条件相近,在直接引用美国相关理论和技术的同时,进一步证实了美国煤层气理论的适用性。澳大利亚结合本国煤储层的低渗特点发展了地应力评价理论^[6],并通过水平井高压水射流改造技术获得产气突破。

关于煤层气矿井抽放(开采)机理,国际上先后提出过以瓦斯主导说、地压主导说和化学作用说为代表的单因素假说及以振动说、破坏区说、分层分离说等为代表的综合作用假说,其中前苏联学者“综合作用假说”的影响最为广泛^[7]。抽放方式主要包括巷道抽放、采空区抽放和废弃矿井抽放,由于传统地下抽放技术造成的成本和作业空间限制以及采动干扰,单纯的矿井瓦斯抽放活动未能大规模开展,经过近一个世纪的努力,全球抽放量仅为 $55 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右。

2.2 国内煤层气地质研究进展

1989年联合国环保署援助项目“中国煤层气资源开发”的实施,正式拉开了我国煤层气地面开发研究的序幕。在“七五”至“八五”期间,提出了“五类生储盖组合形式”、“有效盖层厚度控气”的观点^[8,9],在河北大城和山西柳林取得地面采气试验的突破。

“九五”以来,我国学者根据中国的地质特点,对

中国煤层气理论开展了广泛的探索。提出“中国煤层气聚集区划”,据此对我国煤层气富集分布规律进行了有益的探讨;并开展区域性煤层气成藏条件综合研究,初步提出我国构造、沉积、水文地质条件的控气作用类型;此外对煤层气可采性标志和控制因素进行了较为深入的研究,提出了“叠加生气成藏与储层异常热改造作用”、“地应力与煤储层渗透性定向耦合”等见解。他们尝试构建煤层气地质演化史反演的思路与模型,探讨了煤/水/气三相耦合的岩石力学与渗流力学机理,初步剖析了煤储层中甲烷/二氧化碳/氮气多元气体吸附-解吸的物理化学实质,总结提出了煤层气有利区带“递阶优选”理论和数学模型以及经济评价的思路^[10-14]。以上工作为探索我国煤层气成藏规律和经济开发技术奠定了一定的基础,并在沁水、柳林、韩城、铁法等地的煤层气勘探实践中发挥了重要的指导作用。

2.3 煤层气地质研究发展趋势

煤层气主要以气体吸附态存在于煤储层中,并因此导致煤层气成藏的机制和开发技术与常规天然气截然不同。煤层气地质研究集煤地质学、油气地质学、采矿学、岩石力学和渗流力学、地球物理学等学科相关内容为一体,是充满活力的新型学科交叉领域。

现行煤层气理论主要是在对简单地质历史盆地研究的基础上建立起来的,而地质历史的复杂性则正是导致其具有高度局限性的根本原因。复杂地质历史条件下影响各种地质过程的时空配置特征,直接制约着影响煤层气成藏条件的各种地质场的互动关系,进而导致包括高煤级煤气藏在内的煤层气成藏类型显现出多样性。深入剖析煤层气成藏的这种宏观动力学条件,实现以建模反演技术来恢复煤层气成藏的地质历史选择过程,进而探寻煤层气富集成藏的机理与规律,是国内外该领域广泛关注的重要基础问题。

煤储层含气性和储集性是煤层气成藏的关键内在因素,严格受煤储层本身的物质组成、物理性质以及煤-水-气三相介质之间耦合关系等因素的影响。煤储层极强的非均质性、显著的吸附性以及水对吸附能力的影响,导致煤储层比常规天然气储层更为复杂多变。研究煤-水-气三相介质本身的特征以及三者之间的耦合关系,探索它们对煤储层含气性和储集性的控制机理,剖析它们在煤层气成藏过程中的作用实质,精细描述煤储层的非均质性特征,是该领域前缘性的研究难题。

煤层气藏动力学的实质是能量平衡。动态平衡

靠以煤储层压力为核心的广义压力系统来维系。一旦地质或采动原因变化而打破了系统的平衡,原已聚集的煤层气在自然条件下通过运移通道或逸失使得原有的煤层气藏遭受破坏,或进一步富集而强化原有的气藏,采动条件下则发生解吸产出。深入研究盆地流体场对煤储层压力系统的控制关系,揭示煤储层渗透性随能量平衡系统的变化规律,发展低渗煤储层中煤层气渗流、扩散和运移过程的数值模拟技术,确定煤层气成藏类型的关键依据,进而直接指导低渗煤层气藏的高效开发,是国际煤层气领域长期探索而迄今尚未解决的问题。

建立在地球物理综合测井和三维三分量多波段地震勘探基础上的煤层气藏高精度探测技术,是验证煤层气藏预测结果和探测勘探开发效果的重要手段。然而,煤储层的高度非均质性以及饱和煤储层与无气煤层密度差异极小的特征,使得地球物理信号对煤储层包括含气性、裂隙特征等物性的响应难以识别,因此对煤层气藏探测技术提出了远比常规天然气藏探测更高的要求。完善原有方法的信号处理技术,探索新的探测原理以开发新的方法,研究各类煤储层物性对不同探测方法的响应,进而提高探测精度,是国际上近年来致力发展的重要方向之一。煤储层的增渗、卸压、置换和促进煤层气解吸,是高效开发煤层气的四大基本原理,前人为此进行过不懈的探索,但迄今对低渗煤层气藏的收效甚低。压裂或高压水渗流增渗对软性煤储层的造缝效果极差,在构造流变强烈的煤储层中无法推广。我国近年来开发的邻近保护层卸压新技术在矿井下抽放中极具应用前景,但目前对采动应力场干扰、煤层气流动等方面的研究尚不成熟。注入 N_2 和 CO_2 气体置换煤层甲烷的技术在北美已有工业应用,但对于甲烷低渗的煤储层同样对 N_2 和 CO_2 存在着渗透屏障。根据煤储层的特性,除了有针对性地从技术基础上完善原有的技术方法外,更需要以探究新理论来带动有效方法的开发。

3 煤层气地质研究拟解决的主要科学问题

3.1 煤层气成藏地质过程与动力学机制

煤层气成藏过程宏观上受含煤盆地沉积埋藏史、构造演化史、煤化作用史、地下水活动史和有机质生烃史(“五史”)配置关系的控制,地质选择过程不同,煤层气成藏的动力学机制也不同,由此导致不同类型煤层气藏的形成。煤储层不仅是生烃主体,

也是煤层气储集场所,其生气性和储气性的协同发展受煤中有机质大分子结构演变、煤层孔裂隙系统的发生与发展、煤基质吸附能力变化、流体成分与状态变化等控制,表现在煤层气成藏微观动力学机制上的差异。反演“五史配置”控制下的煤层气富集地质选择历程,揭示“二性协调”作用下煤储层储集性和渗透性的非均质性特征及发展机理,是查明复杂地质条件下煤层气藏形成机理、成藏类型和分布规律的重要基础。

3.2 煤层气储集系统与聚散机制

与常规天然气藏不同,煤层气藏对外界干扰的响应更为敏感。煤层气的聚散取决于地下流体势体现的煤层气能量系统的动态平衡状态。煤层气储集系统受盆地地应力场、地热场、流体化学场和流体动力场互动过程的控制,与煤-水-气多相介质耦合形式和机理密切相关,这些因素与煤储层特性共同制约煤层气的扩散、渗流、运移、逸失或聚集,并将煤层气的生成与聚散过程整合,控制煤层气成藏的可能性,进而影响到由煤储层含气性和渗透性共同体现的可采性。有利煤层气藏条件的构建与系统的动态平衡一旦被打破,煤层气藏则将发生调整,甚至遭受破坏。因此,揭示复杂地质条件下煤层气藏的形成机理、成藏类型、规模和分布规律,前提是必须查明“四场互动”过程及其对地下流体场的控制关系,剖析“三相耦合”的显现形式及其物理化学实质,科学地描述有效压力系统中能量汇聚或再分配的过程,进而揭示能量平衡系统形成与演化的机制。

3.3 煤层气藏经济高效开发的场效应

煤层气的高效经济开发取决于气藏动态平衡体系可否被连续高效地打破,渗流通道网络能否有效地形成与强化,以促使煤层气解吸-扩散-渗流-运移的过程能持续高效地推进。原始地应力场、扰动应力场以及煤储层和围岩力学性质、裂隙系统特征、人工压裂方法等因素,共同制约煤层气地下渗流网络的强化或提高人工卸压的效果,各种因素相互作用的机理尚待查明。采用极性气体置换煤层甲烷的本质,是煤储层中原有化学场与注入气体化学场的叠加与互动,这两类化学场之间的相互作用机制及其与地下渗流场间的关系是目前研究的薄弱环节。对煤层气藏预测和探测及勘探开发技术手段的需求非常迫切,阐明含气性、渗透性、非均质性等煤储层物性在地球物理场中的高精度响应机制,就可能实现复杂地质条件下有效探测技术的变革或突破。

参考文献:

- [1] Boyer C M . The Coalbed Methane Resources and the Mechanism of Gas Production[M]. Chicago :GRI, 989.
- [2] Rightmire C T, et al. Coalbed Methane Resources of the United States[M]. AAPG Studies in Geology # 17, 1989.
- [3] Flores R M. Coalbed methane: from coal-mine outbursts to a gas resource (Special Issue on Coalbed Methane) [J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35: 1- 4.
- [4] Mastalerz M, Glikson M, Golding S D. Coalbed Methane: Scientific, Environmental and Economic Evaluation [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] Scott A R. Composition and origin of coalbed gases form selected basins in the United States[A]. Proc 1993 CBM Symp[C]. The University of Alabama, Tuscaloosa, 1993.
- [6] Horner D M. In-situ stresses: a critical factor influencing hydraulic fracture performance in Australia coal basins[A]. Proceedings 1991 Int CBM Symp[C]. 1991. 445- 450.
- [7] 宋世钊, 译. 煤与瓦斯突出机理[M]. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [8] 李明潮, 梁生正, 赵克镜. 煤层气及其勘探开发[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [9] 张新民, 张遂安, 等. 中国的煤层甲烷[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [10] 杨起, 吴冲龙, 汤达祯等. 中国煤变质作用研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997.
- [11] 秦勇, 曾勇. 煤层甲烷储层评价及生产技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [12] 韦重韬. 煤层甲烷地质演化史数值模拟[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [13] 叶建平, 秦勇, 林大扬. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [14] 孙茂远, 黄盛初. 煤层气开发利用手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.

ADVANCES AND TENDENCIES IN GEOLOGICAL RESEARCHES ON COALBED METHANE

TANG Da-zhen¹, QIN Yong², HU Ai-mei³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 3. China United Coalbed Methane Corporation, Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: We are presently involved in the challenge of geological research on coalbed methane, including: a) to reveal the coordinated relationship between the generation and the preservation of coalbed methane and to discover the forming mechanism, pool-forming types and distribution rules of coalbed methane pools under complex geologic conditions by studying on the geologic processes and dynamical mechanism of pool-formation; b) to analyse the processes of diffusion, percolation, migration, escaping and accumulation of coalbed methane which are commonly restricted by coal-water-gas coupling connection and coal-reservoir features by studying on the reservoir systems and accumulating-disseminating mechanism of coalbed methane; c) to probe into the mutual stimulating mechanism between the geophysical and geochemical field and man-made reconstruction and intensified exploitation and to effectively predict the results of exploration and exploitation of coalbed methane by studying on the field effects during the economical and high-efficiency exploitation of coalbed methane pools.

Key words: accumulating-disseminating process; field effect; pool formation; coalbed methane