

文章编号:1000-0747(2004)06-0014-03

煤层气基础理论、聚集规律及开采技术方法进展

王红岩¹, 李景明¹, 刘洪林¹, 李贵中¹, 李隽²

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院; 2. 中国石油华北油田分公司)

基金项目:科技部“973”“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目(2002CB211705)

摘要:煤层气以呈吸附状态赋存在煤储集层中而有别于常规天然气,导致煤层气藏的形成机制和开发原理与常规天然气藏截然不同。围绕煤层气基础地质理论、煤层气聚集规律和煤层气勘探技术方法三方面,重点研究煤层气的生成、成藏理论、成藏条件,总结出我国以高煤阶无烟煤煤层气富集成藏为代表的煤层气聚集规律,同时对目标区预测技术和低渗强化开采的工艺技术进行分析,提出开展煤层气生成及储集层非均质性研究、煤层气富集成藏机制分布规律和高效勘探开发技术机理研究是解决制约我国煤层气工业取得突破的有效途径。参 21

关键词:煤层气;基础理论;聚集规律;开发技术

中图分类号:TE122.114

文献标识码:A

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。截至 2002 年 11 月,全国已钻煤层气井 214 口,其中生产井 153 口,参数井 59 口,采动区井 5 口,井组 11 个。取得一定商业气流的煤层气井仅占钻探井的 7% 左右,局限在沁水盆地、鄂尔多斯盆地等^[1-4]。目前,我国煤层气成藏理论、分布规律研究及勘探开发技术方法都不成熟,对近 10 年国内外煤层气勘探研究进展进行分析总结,有利于加快适合中国地质特色的煤层气成藏理论和技术方法的形成,使中国煤层气勘探开发早日实现产业化。

1 基础理论研究进展

1.1 煤层气生成理论研究进展

20 世纪 90 年代以来,美国基于碳同位素研究,广泛开展了煤层气成因和来源分析,认为加拿大和美国阿拉斯加州的含煤盆地内煤层气的成因有早期生物气、中期热裂解气和晚期次生物气,同一盆地不同部位的煤层气,有时 1 种成因占主导地位,有时 2 种成因共存,有时甚至是 3 种成因的混合,从而提出“生物型或次生煤层气成藏”理论,并于 1998 年在粉河低煤级煤盆地实现了煤层气商业性开发,带动当年美国煤层气产量跃升到 320 亿 m³。

很多学者受该理论的影响,把我国煤层气碳同位素组成普遍偏轻的现象笼统解释为次生物气。其实煤层气碳同位素组成偏轻主要是因为煤层气的分馏效应^[4,5],主要源于¹²C 优先解吸分馏并被重新吸附。煤层气藏不断遭到破坏,不断恢复,¹²C 不断解吸、散失、吸附,在一定程度上反映了煤层气保存条件的优劣^[2,6]。我国主要煤层气盆地具有多期性发展和复合叠加的地质特征,导致煤层气成藏条件十分复杂。同

时地质时代的新老(生烃母质和岩浆活动)同样控制着甲烷碳同位素组成的轻重^[3,4]。

1.2 煤层气成藏理论研究进展

煤层气主要以吸附态存在于煤储集层中,这既不同于呈液态赋存的石油,又有别于主要呈游离态存在于地层中的常规天然气。煤的吸附性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,研究煤层气成藏理论的基本出发点是同时考虑扩散和运移特性开展成藏模拟。吸附模型有劳布斯模型、潜在理论模型和朗格缪尔模型^[7]。常用的朗格缪尔模型基于气化和凝结之间的动态平衡,仅仅利用甲烷测试煤的吸附等温线,不能满足煤层气的初始和强化开采预测。二元气体吸附和多组分气体吸附在国内外得到应用。

20 世纪 80 年代初,美国在 13 个盆地中启动了全面的煤层气成藏条件探索,对煤层气产出“排水—降压—解吸—扩散—渗流”过程有认识上的突破,最后选择圣胡安和黑勇士两个盆地为开发基地,使地面排采的煤层气年产量从 1984 年的 3 亿 m³ 跃升至 1986 年的 12 亿 m³。随后,将开发试验扩大到皮申斯、尤因塔等 6 个含煤盆地,经过理论与开发实践的多轮反馈,提出了北美西部洛基山造山带高产走廊的煤层气成藏模式,形成以煤储集层双孔隙导流、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、多井干扰等为核心的煤层气勘探开发理论体系。

我国煤层气研究者根据本国的地质特点,提出了“五类生储盖组合形式”、“有效盖层厚度控气”的观点,划分了中国煤层气聚集区,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;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“煤化作用阶跃式控气”、“地应力与煤

储集层渗透性定向耦合”等新的学术思想^[6,8];并提出煤层气有利区带“递阶优选”理论和数学模型以及经济评价的新思路^[8],开展了对煤层气地面开采技术的理论探讨,在沁水、柳林、韩城、铁法等地煤层气勘探的突破中发挥了重要引导作用^[9]。经过十多年来的研究,我国煤层非均一性高和渗透率、储集层压力、含气、含水饱和度低已是各方面专家的共识,同时,在煤层物质组成、脱吸附性、力学性质及渗透性研究等方面也取得一些新的进展。

1.3 煤层气成藏地质主控因素研究进展

煤层气成藏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气史的控制,要求煤层的生气性和储气性共同发展。其动力学实质是一个以煤储集层压力为核心的广义压力系统来维系的能量平衡系统。煤层气成藏的微观动力学特征受煤中有机质大分子结构演变、煤层孔隙-裂隙系统的形成与发展、煤层气实际吸附状态和煤基质吸附能力变化、流体成分与状态变化等所控制。

煤层气成藏动力学可分为沉积动力学、构造和热事件动力学和地下水动力学。

沉积环境控制着煤层气的储盖组合、煤储集层的几何形态、煤层厚度^[10,3],并通过对沉积母质的控制,影响着煤储集层的含气性、吸附性和物性^[11,12]。晚古生代的聚煤作用主要发生在华北和华南一扬子台地区的大型陆表海坳陷内,滨海三角洲及三角洲-碎屑海岸体系是最重要的成煤环境。早一中侏罗世聚煤盆地主要分布在我国北方的大型内陆坳陷盆地,有相当一部分叠加于晚古生代聚煤坳陷之上(如四川盆地和鄂尔多斯盆地)。晚侏罗世一早白垩世、第三纪含煤岩系大多分布在孤立的中小型聚煤盆地中,但聚煤密度大,巨厚-特厚煤层均形成于湖盆(包括近海湖盆)的湖泊淤浅阶段。

按主要聚煤期含煤盆地的构造稳定程度,我国含煤盆地可分为稳定型、过渡型和活动型;按聚煤后的改造程度可分为弱改造型、中间型和强改造型。构造运动的影响一方面表现在地壳的升降与剥蚀会改变地层温压条件,打破原有的动态平衡,另一方面断裂活动可使封盖层产生裂隙或使其断开,形成气体运移通道,也可形成良好的侧向封堵,而使煤层气得以保存。区域构造运动对煤层气成藏有影响,特别是成煤后期(印支期、燕山期及喜马拉雅期)主要构造运动控制的煤层上覆地层厚度可以维持地层压力及相态的平衡,并阻止地层水的垂向交替^[13]。我国东部晚古生代聚煤盆地的地热场具有“多期多热源叠加”的特征^[14]。

水文地质条件对煤层气保存、富集乃至开发有关键性作用,适当的水文地质条件可形成水压封闭,而交

替的水动力破坏煤层气的保存,不利于煤层气的富集^[15]。华北地区水文地质可分为供水、弱交替、强交替、滞缓、停滞、滞水等 6 种类型^[8,16]。沁水盆地南部水文地质单元由多个水文地质子单元构成^[17,18,11],内部存在 4 条重要的水文地质边界,在寺头断裂西侧的郑庄及其附近地区地下水迳流强度可能较弱,较有利于煤层气保存;大宁-潘庄-樊庄一带为等势面“洼地”滞流型,煤层气富集条件好。

2 我国煤层气聚集基本规律研究进展

中国煤层气资源量巨大,不同机构从不同出发点计算的结果,全国煤层气资源总量为 10.6 万亿~35 万亿 m^3 ^[19,20],目前公认的数据为 30 万亿~35 万亿 m^3 。中国石油“九五”、“十五”期间科技攻关研究表明,我国 2000m 以浅的煤层气总资源量为 225 222.58 亿 m^3 ,其中:华北聚气区为 147 979.57 亿 m^3 ,华南聚气区为 41 566.69 亿 m^3 ,西北聚气区为 31 453.08 亿 m^3 ,东北聚气区为 4 223.24 亿 m^3 ^[21]。

我国煤层气分布的基本规律为:①高变质无烟煤煤层气富集成藏。沁水盆地古地热梯度为 5.25~7.54℃/100m,燕山中期十分明确地存在异常热事件。受燕山期异常构造热事件的影响,上古生界煤层的煤阶较高,吸附能力和含气性较大,煤层气富集条件有利。②煤层气高产富集区多位于盆地斜坡带,呈带状展布;我国华北地区高产富集区多呈南北向带状组合,富集区与贫气区相间分布,如太行山东麓、沁水盆地和鄂尔多斯盆地。③我国煤层气资源的分布受控于区域地质动力条件的匹配,构造格局控制煤层、煤阶的展布,保存条件(构造运动、局部构造和上覆地层有效厚度)控制着煤层气的散失与聚集。④煤层气高产取决于影响煤层渗透性的诸多因素。我国煤层气储集层渗透率普遍偏低,大多小于 1mD。渗透率小于 0.5mD 的煤储集层很难获得高的产能。⑤汇水、滞水的区域有利于形成煤层气藏。具有汇水、滞水水文地质条件的地区含气量高,煤层气易于采出。

3 技术方法研究进展

3.1 选择有利区和预测高产富集区分布的理论及方法

煤层气目标区的优选排序应该是多层次的,不可能按照统一标准来对全部煤层气目标区优选排序。“关键要素层次结构递阶优选”方法体系^[8]遵循地质研究一定量排序—地质分析的辩证思路,筛选出 5 个关键要素(含气量、面积、资源丰度、渗透率、临储压力比)和 14 个量化要素。优选排序工作应是递进的,随着优选排序层次的

上升,优选排序结果越来越接近实际情况。文献[2]提出按对煤层气有利选区的预测,分4个层次优选排序,将全国煤层气目标区分为极有利区、有利区、较有利区。极为有利区为晋城、乡宁(大宁—吉县)、韩城、阳泉—寿阳;有利区为离柳—三交、淮北、峰峰—邯郸、安阳—鹤壁、六盘水、恩洪;较有利区为铁法、平顶山、红阳、焦作、开滦、潞安、萍乐、鹤岗、圭山、双鸭山、鸡西、中梁山、天府、芙蓉、松藻、乌鲁木齐老君庙、和顺—左权、织纳、艾维尔沟、石嘴山、呼鲁斯太、哈密、乌鲁木齐白杨河。极有利区域的晋城、乡宁(大宁—吉县)、韩城、阳泉—寿阳的煤层气产能应超过 $5000\text{m}^3/\text{t}$ 。

3.2 低渗透煤层气藏强化开采的关键技术基础

煤层气的开采研究要求揭示煤-水-气三相耦合的岩石力学与渗流力学机理。我国煤储集层普遍渗透率偏低,应针对低渗透煤层气藏强化开采关键技术基础问题开展探讨,对矿井保护层采动增渗卸压效应与机理、地面钻孔强化排采的技术原理和人工致裂径向外加应力场的传播效应与机理进行研究。国内煤层气产业部门经过10年艰苦攻关,已形成一套门类齐全、效果显著的煤层气勘探工艺技术系列,其中,煤层绳索式全封闭快速取心技术、注入-压降试井技术、大地电位法煤层压裂裂缝监测技术、井间地震声波层析成像技术、煤层气测井评价技术和煤层气储集层模拟技术具有重要的价值^[1,16]。羽状水平井、低成本泡沫钻井和高效水力压裂为近期煤层气勘探技术的发展方向。

4 展望

美国的煤层气理论与开发技术处于国际领先地位,但仅加拿大与北美大陆地质条件具有一致性,适用美国煤层气理论。以我国煤层气地质的特殊性为突破点,深入开展基础性研究,会获得一批具有前瞻性的科学概念和结果,带动与我国地质条件类似的其他国家或地区煤层气产业的发展。其重点方向是开展煤层气生成及储集层非均质性、煤层气富集成藏机制分布规律和高效勘探开发技术机理研究。具我国特色的新的煤层气基础理论将会像当年我国的陆相成油理论一样令世人所瞩目,为我国建立21世纪的洁净能源基地奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 赵庆波,等. 中国煤层气勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
- [2] 张建博,王红岩,赵庆波. 中国煤层气地质[M]. 北京:地质出版社,2000. 1-96.
- [3] 钱凯,汪泽成,赵庆波. 煤层气勘探开发理论与实验技术[M]. 北京:石油工业出版社,1997. 37-62.
- [4] 秦勇. 中国煤层甲烷碳同位素特征及成因探讨[J]. 中国矿业大学学报,2002,29(2):113-119.
- [5] 张建博,陶明信. 煤层甲烷碳同位素在煤层气勘探中的地质意义

[J]. 沉积学报,2000,18(4):611-614.

- [6] 秦勇,朱炎铭,范炳恒. 沉积有机质二次生烃理论与应用[M]. 北京:地质出版社,2001. 23-38.
- [7] 王洪林,唐书恒,林建法. 华北煤层气储层研究与评价[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2000. 20-140.
- [8] 叶建平,秦勇,林大杨. 中国煤层气资源[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999. 2-140.
- [9] 孙茂远. 煤层气开发利用手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998. 10-29.
- [10] 刘焕杰,等. 山西煤层气地质[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998. 12-80.
- [11] 张建博,王红岩. 沁水煤层气有利区预测[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999. 5-39.
- [12] 张群. 平衡水条件下煤对甲烷的等温吸附特征研究[J]. 煤炭学报,1999,24(6):566-570.
- [13] 姜波. 淮北地区煤储层物性及煤层气勘探前景[J]. 中国矿业大学学报,2001,30(5):433-437.
- [14] 杨起,汤达祯. 华北煤变质作用对煤层含气量和渗透率的影响[J]. 地球科学,2000,25(3):273-278.
- [15] 王明明,卢晓霞,金惠. 华北石炭-二叠系煤层气富集区水文地质特征[J]. 石油实验地质,1998,20(4):385-393.
- [16] 赵庆波,等. 中国煤层气研究与勘探进展[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001. 1-95.
- [17] 傅雪海. 沁水盆地中—南部水文地质控气特征[J]. 中国煤田地质,2001,13(1):31-34.
- [18] 王红岩,张建博,刘洪林. 沁水盆地南部煤层气藏水文地质特征[J]. 煤田地质与勘探,2001,29(5):27-31.
- [19] 张新民,等. 中国的煤层甲烷[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1991. 10-125.
- [20] 赵庆波,等. 中国煤层气勘探与开发[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003. 3-32.
- [21] 王红岩,张建博,刘洪林. 中国煤层气可利用经济储量预测与发展前景[J]. 石油勘探与开发,2003,30(1):15-17.

第一作者简介:王红岩(1971-),男,江苏丰县人,博士,高级工程师,现从事天然气(含煤层气)综合地质研究。地址:河北省廊坊市万庄44号信箱,天然气地质研究所,邮政编码:065007;电话(010)69213277。E-mail:wanghongyan69@petrochina.com.cn

收稿日期:2004-02-27 修回日期:2004-08-03

(编辑 王大锐)

Progress of basic theory and accumulation law and development technology of coal-bed methane

WANG Hong-yan¹, LI Jing-ming¹, LIU Hong-lin¹, LI Gui-zhong¹, LI Jun² (1. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Hebei 065007, China; 2. Huabei Oilfield Company, PetroChina, Hebei 062552, China)

Abstract: Coal bed methane (CBM) is different from conventional natural gas as it exists in coal reservoir in adsorption status, which leads to the great difference in formation mechanism and development theory. Focused on basic geology theory, accumulation law and exploration technology of CBM, the study of the CBM formation, theory and condition of reservoir formation was carried out to conclude the accumulation law represented by the enrichment of high coal rank anthracite. The prediction technology of target areas and enhanced recovery technology of low permeability reservoir are presented. The researches on CBM formation, reservoir heterogeneity, hydrocarbon accumulation and reservoir formation mechanism, and effective exploration and development technology are effective way to achieve breakthrough of national CBM industry.

Key words: coal bed gas; basic theory; accumulation law; development technology