

·学科进展与展望·

中国煤层气产业发展所面临的若干科学问题

秦勇¹ 朱旺喜²

(1 中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221008;

2 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085)

[摘要] 中国煤层气产业目前已步入商业化生产的启动阶段,但产业发展仍面临着许多基础科学问题需要研究和解决。为此,作者提出我国煤层气产业发展目前所面临的6个科学问题,分析了解决问题的基本思路,认为煤层气原位赋存状态以及吸附/解吸效应、煤层气成藏动力条件与规律预测、煤层气地质选区理论与方法基础、煤储层渗透率的构造-采动控制效应、低渗煤层气藏有效失衡的叠加场效应是我国近期所应开展的主要基础研究方向,并认为煤层气开采诱发的环境保护基础研究应该受到重视。

[关键词] 中国,煤层气,产业,科学问题

将煤层气作为天然气资源进行商业性开采,是世界油气工业史上的一个重要里程碑^[1]。中国煤层气勘探已走过二十余年历史,目前步入了商业化生产的启动阶段,处于从煤层气资源大国转型为生产大国的关键时期^[2]。在此探索历程中,不仅极大地深化了对中国煤层气地质条件的基本认识,并且在勘探与开发技术基础研究方面取得显著进展。然而,我国在煤层气产业发展中仍存在许多科学问题尚待研究解决。鉴于此,本文作者就其中的若干科学问题进行了思考,希望对推动适合于我国地质条件的煤层气基础研究、发展我国的煤层气产业有所裨益。

1 煤层气原位赋存状态以及吸附/解吸效应

要客观地获取煤层气资源的数据,首先应准确理解煤层气在煤中赋存的状态,建立科学的含气量测试方法,准确估算枯竭压力下的残气率。对煤层气吸附/解吸特征的理解,深刻地影响到煤层气可采资源量评价、煤储层产能数值模拟、煤层气井生产历史拟合、煤储层物性在排采过程中动态变化规律等一系列生产问题的科学解决。由此,目前应该正视如下两个基本问题。

第一,地层条件下(原位)煤层气在煤中赋存形

式是否仅局限于目前所公认的状态?实践中经常发现,采用现行测试方法所得含气量来预测的煤层气资源量往往低于开采后所认识的资源量。例如,采煤后验证的煤层气资源量往往远高于勘探得到的资源量,矿井瓦斯突出量一般是突出煤体中煤层气资源量的几倍到上百倍。超量的煤层气来自哪里?显然,仅用围岩气或采动影响区气无法全面解释,还应从煤层本身寻找原因。Alexeev等发现,煤大分子结构在甲烷吸附/解吸过程中发生了明显变化,认为煤中存在游离、吸附和固溶态三种甲烷形态^[3]。其中,固溶态甲烷以晶体形式存在于煤基质中,采用常规方法不可能对其探测,导致目前煤层气资源评价的不准确性。Radovic等也得出了类似的结论^[4]。由此进一步设想,煤中相当一部分甲烷的原位赋存形式是否可能类似于天然气水合物中的甲烷?这些工作作为阐释前述自然现象、厘定煤层含气性特征,探讨煤层气资源评价原理、发展开采新技术和防治煤矿瓦斯灾害提供了新的思路。

第二,传统吸附模型能否真实反映地层条件下煤层气的赋存状态?煤的吸附性是评价煤层含气性和煤层气可采性的重要基础。近年来发现,吸附压力增高,煤对 CH_4 、 CO_2 等气体的吸附等温线并不像传统吸附模型所描述的那样呈单调增大函数增长,

本文于2006年2月20日收到。

而常常表现为“单峰”甚至“双峰”的分布形式^[5],这是气体超临界吸附的典型表现!由此,对传统吸附模型的客观性和科学性提出了质疑。例如:煤对气体的超临界吸附具有哪些基本规律,是否只受物理吸附力的控制,如何利用现代化学(如量子化学等)的理论与方法来阐释传统理论与客观吸附现象之间的矛盾,其动力学实质究竟表现在哪些方面?换言之,煤层气超临界吸附动力学模型及机理就是本领域面临的一个重要科学问题。显然,通过阐明这些科学问题,可为优选煤层气有利区带和发展煤层气开采技术提供直接的科学依据。

2 煤层气成藏动力条件与规律预测

以服务于煤层气勘探开发为目的,我国在煤层气成藏动力学条件及其效应方面取得诸多研究进展^[6,7]。在此基础上,为了满足产业发展的需要,还需深化研究如下三个层面的基础问题:

第一,拓展大尺度空间煤层气成藏作用的研究,从“域”上把握煤层气成藏规律,为国家层面上煤层气勘探开发的宏观部署和决策提供地质依据。美国学者在上世纪90年代初对北美落基山造山带晚白垩世-始新世前陆盆地群煤层气高产“走廊”的预测,对该盆地群90年代中至后期的煤层气勘探开发起到了显著的指导作用^[8]。以戴金星院士为代表的我国天然气地质专家在“七五”到“八五”期间建立的中亚巨型气聚集域理论体系^[9],促使我国西北侏罗系煤成烃勘探进入高潮,为我国油气工业发展做出了重大贡献。关于我国煤层气区域分布规律及其受控机理的认识,目前多停留于形态学或几何学层面上的分析对比,缺乏从系统论(如含气性统一性)高度的规律总结。我国有无类似于北美落基山造山带煤层气高产走廊或常规天然气中亚聚集域的“煤层气聚集域”,具有哪些地质表征,受控于什么样的成藏动力学条件和过程?认识这些规律对国家煤层气工业的宏观部署和决策具有哪些意义?凡此种种,无疑是确定我们近期和将来煤层气勘探方面所要解决的重要基础问题。

第二,深化中尺度空间煤层气成藏作用的研究,从“盆”上把握煤层气有利区带展布规律和实质,为勘探部门确定煤层气目标区提供地质依据。我国前期对大型煤层气盆地的勘探工作往往是从“盲人摸象”开始,沁水盆地和鄂尔多斯盆地就是典型实例,以致煤层气商业性生产的突破滞后了十余年。究其原因,除了非技术层面因素以及认识上存在由浅入

深的过程之外,科学思维的局限性是其重要因素。具体来说,就是没有充分认识到从“盆”上把握煤层气有利区带展布规律的重要性,使煤层气勘探开发试验绕了许多不必要的弯路。尽管近年来国家专门立项对大型盆地煤层气成藏作用剖析研究,并取得阶段性成果,但仍然面临两个问题:其一,在勘探工程实施之前,如何能从成藏动力学角度较为可靠地预测盆内煤层气富集高产潜势及其分布规律,特别是富集程度/渗流能力/地层能势之间的耦合或有利配置关系?其二,以沁水盆地或鄂尔多斯盆地为例取得的有限认识,在什么样的条件下才能被有效用来预测其他盆地内部煤层气富集高产潜力区块的分布规律?

第三,细化小尺度空间煤层气成藏作用的研究,从“藏”上把握煤层气富集高渗特征,为开发部门布置钻孔甚至井网提供地质支持。煤层气“藏”多数只分布在盆内非常局限的部位。因此,准确探测或预测这些气“藏”的位置及“藏”内煤层气高渗条件,就成为决定煤层气开采成败的关键因素。我国前期开展的类似研究通常是在勘探工程取得实测数据之后的规律分析,但我们希望的是,在未动或少动工程前提下能够预测气田内部煤层含气性、渗透性、流体能势的非均一性分布特征,国内外为此进行过大量探讨。但是,作为一类间接方法,其可靠性和科学性还有赖于两方面问题的深化解决:其一,实践中采用的几乎都是经验统计模型,缺乏将基础理论与探测(预测)对象直接联系起来的理论研究或中间模型,难以开发出对煤层气更有针对性的新技术新方法;其二,现有的地球物理探测仪的精度,往往难以满足分辨煤储层某些参数微小变化的需要。

在上述三个层面研究的基础上,应进一步综合研究煤层气能量系统动态平衡演化与成“藏”之间的关系,厘定煤层气成“藏”的类型与机理,建立成“藏”过程建模反演技术,实现对煤层气“藏”分布规律的科学预测。

3 煤层气地质选区理论与方法基础

我国迄今共在42个地区进行过煤层气勘探或开发试验,但地质选区放弃率高达80%。问题出在哪里?采用的选区理论和方法是否具有针对性和有效性?对于这一问题,可以通过回顾历史来寻找答案与解决方法。从上世纪80年代中期至今,我国煤层气地质评价选区理论与方法经历了从引进国外经验到针对我国特点考虑问题、从单因素机械叠加到

多因素分级综合评价、从地质表象罗列到控气动力学条件分析的认识深化过程,大致分为三个阶段:

第一阶段,80年代中期到1998年,主要引进美国经验,考虑单因素及其叠加,采用地质描述或综合表格的方式来表述选区评价标准。总体来看,该阶段选区参数有向复杂化方向发展的趋势,后期注意到资源规模、煤层含气性和渗透性、地层流体能势的综合研究与选区标准定量化相结合的问题。这一方面显示出对控气地质因素认识的不断深入,但另一方面却使实际操作的难度加大,选区的不确定性更为明显,从而导致选区的科学性变差。同时,选区定量化这一必然发展趋势和不同级别评价单元应采用不同评价标准这一根本问题,在实质上仍未得到充分重视。

第二阶段,1999年到2002年,针对我国煤层气地质特点,参考前期取得的煤层气勘探开发试验成果,考虑风险概率和系统论方法,建立起新的选区理论与方法。为了解决上一阶段留下的问题,提出了“风险评价+层次分析”的选区思想,建立起“一票否决+递阶优选”的有利区带优选方法体系,并对全国29个聚气带和115个目标区进行了评价优选^[10,11]。其后,国内有关单位采用这种思想和方法,对我国部分盆地的煤层气高产富集区进行了预测。

第三阶段,2002年以来,在前期勘探开发试验和选区实践的基础上,考虑主控因素对煤层气成藏效应的控制机理,致力于基于煤层气成藏动力学分析的地质选区理论与评价方法的研究。研究发现,煤层气成藏效应受控于各类地质动力条件,是地质过程中地层能量动态平衡的结果。但是,如何能透过动力条件表象来深刻认识成藏作用的结果(成藏效应),进而达到科学预测煤层气富集高渗区展布规律的目的?这一既有科学意义又有实用价值的问题,正是上述第二发展阶段对煤层气地质选区研究提出的挑战或留下的难题。目前,中国矿业大学等已开始研究基于煤层气成藏动力学分析的地质选区理论与评价方法,并取得阶段性研究成果。

4 煤储层渗透率构造-采动控制效应

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:在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^[10]。再如,构造应力场主应力差-煤储层

裂隙发育状况-顶板裂隙发育状况之间的耦合关系,对煤储层现今渗透率的高低起着重要控制作用^[12]。又如,构造环境不同,煤层气井生产状况往往存在显著差异^[13]。但是,能否通过煤层气基础地质研究去有效地解决生产地质问题?进一步来说,有效地将地质研究与开采地质变化结合起来,这一重要“中间环节”长期以来受到了不应有的忽视。其中,煤储层主要物性要素(如煤储层渗透率)-构造环境-物性要素采动变化-煤层气井产能之间的关系和机理,是亟待研究的关键科学问题。

为了解决上述问题,需要就如下方面开展探索:其一,煤储层渗透率的构造控制规律与机制,其核心是现代构造应力场、构造形态、天然裂隙与试井渗透率之间的关系,查明构造作用对煤储层原始渗透率的控制规律,并从地质机制或原理上予以解释,然后提出预测渗透率的参数体系和具体指标;其二,煤储层渗透率的排采控制规律与机制,其核心是煤储层压力/含气量/含气饱和度、温度、煤基质自调节效应与煤储层渗透率变化之间的关系,查明它们对渗透率的表现形式与规律,建立预测煤储层渗透率在排采过程中变化的数学模式;其三,煤储层渗透率的构造-排采耦合控制规律与机制,重点研究不同构造环境下煤储层渗透率在排采过程中变化规律的差异性,寻求两者共同对渗透率的控制关系,并将这种关系引入上述数学模式,建立或修正的可用于煤储层精细数值模拟的模型与方法。

该方面研究的主要难点在于:第一,模拟环境与煤储层所处的地层环境之间存在较大差异,怎样利用现代测试与信息技术来有效地模拟排采过程中煤储层渗透率的动态变化规律;第二,在模拟过程中,怎样把握和处理煤储层物性参数在不同排采阶段的变化状况;第三,实验模拟和储层模拟是利用两种不同的方法和手段来模拟煤储层渗透率在排采过程的变化规律,如何能将两者有效结合,并建立具有精细描述功能的煤储层渗透率动态预测模型。

5 低渗煤层气藏有效失衡的叠加场效应

低渗条件下煤层气高效开采能否实现,取决于能量系统的动态平衡关系能否被连续高效地予以打破,渗流通道网络能否有效地形成与强化,以及煤层气解吸-扩散-渗流-运移的过程能否持续高效的可控推进。原始地应力场、扰动应力场以及煤层和邻近层岩石力学性质、原有裂隙系统特征、人工造缝方法等因素,共同控制着煤储层裂隙网络被强化或再造

及人工卸压的机理与效果。采用 CO_2 、 N_2 等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之间的叠加与互动。

因此,叠加物理场、叠加化学场以及两者复合场施加效果和边界条件的场效应机理,是制约低渗煤层气藏高效开采的“瓶颈”问题。透彻理解叠加场的效应和机理,正是研发煤层气高效开采技术的首要基础:

首先,是叠加应力场的增渗卸压效应与机理。例如:在矿井保护层开采垂向扇形辐射叠加应力场条件下,单一煤储层或煤储层群中煤层气压力与流场的变化,煤储层渗透性随叠加应力场变化的规律和敏感程度;地面垂直井水平径向辐射叠加应力场条件下,不同类型致裂液压力在煤储层中传导的途径以及诱发裂隙的发育方式,局部应力场变化导致的煤层气流场分布规律,煤基质自调节效应与煤储层压力系统变化的耦合关系等。

第二,是叠加化学场促进煤层气置换与解吸的效应和机理。包括 N_2 、 CO_2 及其他可能置换气体与各类煤基质之间的化学亲和能力,含气煤体在不同气体介质环境下的力学和物理化学性质,煤层气能量平衡系统对外来气体进驻的兼容特性,置换气体注渗到煤基质孔隙中的方式与温压条件,叠加化学场与地下渗流场之间的关系与实质等。

第三,是低渗煤层气藏强化开采的关键技术基础。在矿井抽放方面,重点研究大面积抽放的主控因素和指标以发展远距离保护层超强卸压抽放新技术,并探讨废弃矿井抽放的有效技术途径,同时注重剖析高压水射流、可控声振、多脉冲电磁辐射等叠加场效应与抽放效果之间的关系,探讨发展低渗煤储层超强抽放新技术的可能性。在地面钻孔抽采方面,针对煤储层伤害、降压漏斗难以有效扩张、人工致裂有效影响半径不足、注气屏障难以突破等主要技术问题,重点研究钻井循环流体对煤储层的作用特征和实质,探讨多井干扰的条件、效应和机理,研究不同类型煤储层对压裂、注气工艺和参数的敏感性与适用性,变革低渗煤层气藏欠平衡钻进技术,带动井网布置及排采优化新技术的形成。

通过上述研究,查明叠加物理场-叠加化学场-地质场之间的耦合关系与机理,可望为提升煤层气传统增产措施和研发新技术提供科学基础。

6 煤层气开采诱发的环境保护基础问题

美国 2000—2002 年期间煤层气产量增长速度

减缓,主要原因在于环境保护问题,特别是煤层气井采出水的处理^[14]。我国前期处于煤层气勘探开发试验阶段,相关的环境问题并不显著。目前,我国煤层气商业化生产已经启动,环保问题需要提上议事日程。

总体来看,煤层气开发诱导的环境问题包括地表环境破坏、地下环境污染、大气环境污染三个方面,其中的许多内容与基础研究密切相关。例如,煤层气中杂质气体(H_2S 、 CO_2 等)的富集与分布、煤层气开采活动与水文系统的相互作用、 CO_2 注入的固流耦合与稳定性、煤层气开采与采煤地质条件关系、回注的采出水与地层之间的水岩作用、煤层气和钻井废弃液中有毒有害物质的转化迁移等,在今后的煤层气开采环境基础研究中应该得到高度关注。

参 考 文 献

- [1] Flores R M. Coalbed methane: From hazard to resource. *Int J Coal Geology*, 1998, 35(1-4): 3-26.
- [2] 秦勇. 中国煤层气勘探当前所处的发展阶段. *天然气工业*, 2006, 26(1): 1-5.
- [3] Alexeev A D, Ulyanova E V, Starikov G P et al. Latent methane in fossil coals. *Fuel*, 2004, 83(10): 1407-1411.
- [4] Radovic L R, Menon V C, Leon Y et al. On the porous structure of coals: Evidence for an interconnected but constricted micropore system and implications for coalbed methane recovery. *Adsorption*, 1997, 3(3): 221-232.
- [5] Krooss B M, van Bergen F, Gensterblum Y et al. High-pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated Pennsylvanian coals. *Int J Coal Geology*, 2002, 51(1): 69-92.
- [6] 秦勇. 中国煤层气地质研究进展与述评. *高校地质学报*, 2003, 9(3): 339-358.
- [7] 宋岩, 张新民, 柳少波. 中国煤层气基础研究和勘探开发技术新进展. *天然气工业*, 2005, 25(1): 1-8.
- [8] Johnson R C, Flores R M. Developmental geology of coalbed methane from shallow to deep in Rocky Mountain basins and in Cook Inlet-Matanuska basin, Alaska, U.S.A. and Canada. *Int J Coal Geology*, 1998, 35(1-4): 241-282.
- [9] 戴金星, 李先奇. 中亚煤成气聚集域东部气聚集带特征. *石油勘探与开发*, 1995, 22(5): 1-8.
- [10] 叶建平, 秦勇, 林大扬等. 中国煤层气资源. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [11] Qin Yong, Ye Jianping, Lin Dayang. Geological seeking for potential CBM-accumulating zones and districts in China. In: *Proceedings of the 2000 Int Symposium on Mining and Science and Technology*, Xie Heping and Golosinski T S (ed). Rotterdam: Balkema Publishers, 2001, 243-246.
- [12] 秦勇, 张德民, 傅雪海等. 山西沁水盆地中-南部现代构造应力场与煤储层物性关系之探讨. *地质论评*, 1999, 45(6): 576-583.

[13] 叶建平. 水文地质条件对煤层气产能的控制机理与预测评价研究(博士学位论文). 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2002.

[14] Fischer P A. Unconventional gas resources fill the gap in future suppliers. *World Oil*, 2004, 225(8): 41—44.

SEVERAL SCIENTIFIC PROBLEMS FACED IN DEVELOPING CHINA'S COALBED METHANE INDUSTRY

Qin Yong Zhu Wangxi

(China University of Mining Technology, Xuzhou 221008;
National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

Abstract The China's coalbed methane (CBM) industry has now turned into the starting-up stage of the commercial production, but the development of the industry faces still with a variety of the academic issues that needs to be researched and resolved. Thus, based up the practice and thought, the authors in this paper put forward six academic issues confronting by the CBM industry in China, and analyzed the primary thought to resolve the problems. The authors considered that the major aspects of the basic researches for the CBM industry in China are as following: the in-situ occurrence and absorbing/desorbing effects of CBM, the dynamic conditions and prediction of the CBM-pool formation, the theory and methodology for selecting the potential CBM-districts or-zones, the control of the structure and mining to coal reservoir permeability, and coupling-field effects led to the impactful destruction of the pressure system equilibrium in CBM pool. It was yet suggested that the basic research for the environmental protection induced by CBM mining should be taken as an attention.

Key words China, coalbed methane, industry, academic issue

·资料·信息·

2006年度申请国家自然科学基金项目数据统计

截至时间:2006年4月21日

资助类别	亚类说明	科 学 部							合计
		数理	化学	生命	地球	工程与材料	信息	管理	
面上项目	自由申请	2 877	3 813	18 175	3 163	7 247	4 380	3 215	42 870
	青年基金	810	1 253	5 411	1 047	2 169	1 751	893	13 334
	地区基金	109	199	1 636	166	265	109	131	2 615
重点项目		145	108	652	236	192	87	77	1 497
重大研究计划项目	面上项目	6	36	35	0	17	14	0	108
	重点项目	5	13	25	0	11	11	0	65
国家杰出青年科学基金项目	杰出青年	220	223	421	182	292	203	47	1 588
	杰出外籍	10	10	30	6	6	14	1	77
海外或香港、澳门青年	海外合作	37	40	176	31	47	60	13	404
学者合作研究基金项目	港澳合作	7	3	12	1	6	15	4	48
	重点期刊								63
专项基金项目	数学天元	150							150
	科学仪器	15	18	14	5	12	21	0	85
国际(地区)合作与交流项目	重大合作	9	22	51	24	27	14	8	155
联合资助基金项目	面上项目	85	0	0	0	70	104	1	260
	重点项目	2	0	0	0	4	5	0	11
合计		4 487	5 738	26 638	4 861	10 365	6 788	4 390	63 330

(注:由于篇幅有限,本表中有的项目和科学部是简称)

(计划局 孟宪平 供稿)