

MATHEMATICAL
SIMULATION
RESEARCH
ON GEOLOGICAL
HISTORY
EVOLUTION
OF COALBED
METHANE

● 韦重韬 著

煤层甲烷地质演化史数值模拟

中国矿业大学出版社

责任编辑 刘社育

封面设计 肖新生

ISBN 7-81040-913-1



9 787810 409131 >

ISBN 7-81040-913-1/TD · 99 定价:30.00 元

P618.11
V1-233

MATHEMATICAL SIMULATION RESEARCH ON
GEOLOGICAL HISTORY EVOLUTION OF COALBED METHANE

煤层甲烷地质演化史数值模拟

韦重韬 著

中国矿业大学出版社

893695



内 容 提 要

本书以煤层甲烷地质研究成果为基础,运用煤田地质学、油气地质学、渗流力学、数值分析等学科领域的先进理论和方法,建立了煤层甲烷生成、运移、聚集、散失动态平衡动力学地质模型和数学模型以及相应的解算模型和计算机模型。通过模拟运算,定量研究了煤层甲烷地质历史演化特征,提出了煤层甲烷地史演化的地质模式,探讨了不同地质历史演化阶段煤层甲烷的聚散特征及对其现今富集程度的控制和影响。对山西沁水煤田中部地区山西组主煤层的煤层甲烷地史演化过程进行了定量模拟,取得了基本符合实际的模拟验证结果。

本书从全新的角度出发,利用计算机等现代技术对煤层甲烷地质演化史进行研究,为煤层甲烷地质工作者提供了很有价值的新思路和新方法。对煤层甲烷地质理论、勘探评价、地面开发选区及煤矿瓦斯地质等方面具有较大的意义。可供煤层甲烷研究及工程技术人员以及煤田、油气地质工程技术人员和有关院校师生参考。

责任编辑 刘社育

煤层甲烷地质演化史数值模拟

韦重韬 著

中国矿业大学出版社 出版发行

新华书店经销 北京地质印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.5 字数 211 千字

1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~800 册

ISBN 7-81040-913-1/TD·99

定价:30.00 元

序

煤层甲烷作为一种非常规性天然气,已被许多国家视为 21 世纪洁净燃料和化工原料的重要来源。迄今为止,世界上已有 29 个国家和地区开展了有关煤层甲烷的勘探、开发和研究工作,其中美国已取得了巨大成功。

近年来,我国政府和有关部门对煤层甲烷资源给予了高度重视。自本世纪 80 年代以来,先后进行了全国性、区域性和某些重点矿区或煤田的煤层甲烷资源评价、开采技术条件和开发工艺的调查研究和试验,并施工了多达 110 口参数井或生产试验井。对我国煤层甲烷资源状况、赋存规律及地质控制因素有了初步认识,取得了大量可喜成果。适合于中国地质特征的煤层甲烷基础地质理论正在逐步形成。但从系统工程和工业性开发的角度看,我国煤层甲烷基础地质研究的广度、深度和投入力量尚嫌不足,从理论、方法到实践均有待深化。

煤层甲烷地质历史演化是煤层甲烷基础地质理论的一个重要内容,目前国内外尚处于定性至半定量的水平,定量地研究这个问题有很大的难度。韦重韬博士以大量实际工作成果和国内外有关成果资料为基础,以煤层甲烷地质理论为立足点,综合煤田地质学、油气地质学、渗流力学、煤矿瓦斯安全技术等学科领域的理论和方法,采用计算机数值模拟方法,围绕这个问题开展了数年的潜心研究。建立了煤层甲烷生成、运移、聚集及散失动态平衡动力学地质模型及相应的数学模型和计算机解算模型,运用数值模拟方法定量研究了不同设定地质条件下煤层甲烷的生、运、聚、散过程,模拟了沁水煤田中部地区山西组主煤层的煤层甲烷地质历史演化过程,并依据模拟成果评价了区内煤层甲烷地面开采有利选区,探讨了煤层甲烷地史演化过程的基本规律及煤层甲烷聚散特征,总结了煤层甲烷富集程度的控制和影响因素,为煤层甲烷地面开采选区评价奠定了重要基础。书中提出了很多新颖的观点和认识。

本书是关于煤层甲烷基础地质理论的专著,作者从全新的角度,采用高度定量化的方法,对煤层甲烷地质历史演化这一重要的理论问题进行了有益探索,获得了一系列的新见解、新认识和新成果,丰富和充实了煤层甲烷基础地质理论;同时,对煤层甲烷地质历史演化过程认识的深化、煤层甲烷地质历史演化数值模拟方法的发展以及对煤层甲烷地质勘探、地面开采选区评价的可靠性和精度的提高不无裨益。因此,本书具有较高的理论价值和实际意义。

刘焕奎

1998 年 8 月于中国矿业大学资源与环境科学学院

前 言

煤层甲烷属非常规天然气,在全球范围内蕴藏量巨大。它是一种高效、洁净的新型能源和用途广泛的化工原料。在世界能源多元化发展的今天,其开发利用越来越受到各国的重视。我国有着丰富的煤层甲烷资源,迄今为止,国家已投入大量人力和物力实施煤层甲烷地质基础理论、地质勘探评价和开采工艺等方面的科学研究及工程项目,取得了很大进展。目前存在的主要问题是地面开采试验井产能稳定性不高。要解决这个问题,除了改进地面开采工艺技术外,还需要进一步提高地面开采选区评价的准确度和可靠性。

目前,研究者们主要从区域地质条件入手进行煤层甲烷资源勘探评价和地面开采选区评价,对煤层甲烷地质历史演化过程的分析只是一个次要的方面,而且这一工作仍处于定性—半定量水平。在地质历史进程中,煤层甲烷生成、运移、聚集及散失的演化过程极为复杂,这一过程受到煤层及含煤岩系自身特征、煤层埋藏史、煤层有机质成熟生烃史、煤储层物性特征演化史、构造运动发展史和盖层形成发展史等诸多因素的控制和影响,多个因素综合作用,决定了不同地质历史时期煤层甲烷的聚集和散失水平,最终影响和控制了煤层甲烷在现今条件下的富集程度和煤储层物性特征。也就是说,这一过程决定了煤层甲烷地面开采选区评价的两个最基本、最重要的因素——含气性和可采性,因此,对煤层甲烷地质演化史进行详细研究是提高地面开采选区评价的一个重要途径。另一方面,煤层甲烷地质历史演化过程的定量研究开展尚少,人们对这一过程的认识仍然不足,而探索未知世界是科学研究的重要目的之一,所以,对煤层甲烷地质历史演化过程的定量研究具有较大的理论和实际意义。

煤层甲烷在地质历史中的演化是一个多因素综合作用的复杂动态过程,是煤层甲烷地质研究工作的一个理论难点。所幸的是,前人在煤层甲烷基础地质、资源评价、实验室分析及地面开采工程等方面取得了大量成果,为开展这项工作提供了丰富的资料;相关学科领域如煤田地质学、油气地质学、盆地分析及煤矿瓦斯通风安全技术等也有很多先进的理论和方法可供学习、借鉴;此外,数值计算方法和电子计算机技术也为煤层甲烷地质历史演化过程的定量模拟研究提供了精确、高效的工具和手段。

在过去数年中,作者作为主要参加者之一,参加了著名沉积学家刘焕杰教授主持的煤层甲烷资源评价科学研究课题,同时查阅了大量国内外的煤层甲烷地质资料,以此为基础,通过综合分析,建立了描述煤层甲烷在地质历史进程中生成、运移、聚集及散失过程的动态平衡动力学地质模型和数学模型,研制了相应的数值解算模型及计算机模型。通过大量模拟运算,探索了煤层甲烷在不同地质条件下的演化过程并总结了各种演化作用的基本规律及其控制影响因素。以山西沁水煤田中部地区山西组主煤层为例,进行了实际模拟计算,进一步综合分析了煤层甲烷地质历史演化过程,同时也验证了模型的正确性和有效性;最后以理论和实际模拟研究成果为基础,对煤层甲烷地质历史演化过程的演化阶段及演化模式的划分及其特征进行了探讨,分析和论证了处于不同演化阶段及演化模式条件下的煤层甲烷聚

集和散失特征,总结了各种地质条件及地质历史演化过程对现今煤层甲烷富集程度的控制和影响作用。在工作过程中,还摸索了一套以煤田地质勘探成果资料及一定数量分析测试数据为基础,定量研究煤层甲烷地质历史演化过程的模拟方法。

笔者经过三年多的艰苦探索,获得了大量的模拟数据,并完成了本书初稿的写作。在此期间,刘焕杰教授给予了悉心指导,审阅了全书并欣然作序;贾玉如教授、秦勇教授、桑树勋副教授对本书提出了许多宝贵的意见和建议;煤田、油气地质学界的知名学者如唐修义教授、管守锐教授、何锡麟教授、王桂梁教授及丁广骧教授、曾勇教授、范炳恒副教授、岳建华副教授、杨勇国副教授、姜波副教授、孟健讲师、张有生工程师、宋党育硕士、郭英海博士、李壮福硕士等,从文稿评审、学术资料、计算机数值方法、样品分析等方面给予了大力支持和帮助;野外工作得到了有关煤田地质勘探局及勘探队、煤矿的大力协助和支持;徐倩倩助理工程师在数据处理和文稿整理等方面给予了大力支持;家父韦林辉对文稿进行了润色。本书得以正式出版,与上面提到的众多专家、同行们的指导、帮助和鼓励是分不开的,笔者谨向他们致以诚挚的谢意!

煤层甲烷地质历史演化数值模拟研究目前正处于起步阶段,作者在此仅迈出了一小步,从理论模型、数值方法、各种地质演化过程的更深入认识到研究成果的实际应用等还有许多工作仍需要我们继续努力。作者将本书奉献给同行们,希望得到批评指正,同时更希望她能起到“抛砖引玉”的作用,以共同促进祖国煤层甲烷地质理论及开发事业的发展!

作 者

1998年8月

Mathematical Simulation Research on Geological History Evolution of Coalbed Methane

(Detailed abstract)

A geological dynamic equilibrium kinetic model describing geological history evolution of coalbed methane (CBM) was built based on the achievements of recent CBM research, oil and gas geology and other regions. The kernel of the model is that CBM's generation, free and adsorptive gas and migration or dissipation gas quantity in coal reservoir is in a dynamic equilibrium state. Huge factors controlling and affecting the process are considered in the model. Based on the geological model, a mathematical model including partial differential equation describing the diffusion in cap, gas flow in cleat system or in fracture of cap and formulas calculating various geological factors are formed. By using modern numerical method and computer technology, the mathematical model was solved successfully. Based on the above, different presumptive geological condition and an example in QinShui coal field were calculated. Through large amount of calculation and comprehensive analysis, the following conclusions were achieved.

1. Maturation and gas generation of organic matter in coal seam is the material foundation of CBM's geological evolution. The majority of gas generated in geological history has dissipated and only small quantity of it preserves in coal reservoir in adsorptive or free state in recent time.

2. Reservoir pressure keeps CBM be adsorptive in coal reservoir. In geological history, reservoir pressure system in coal seam can be classified into three kinds: close system which has no opening passage between coal reservoir and open air and expanding energy of gas keeps reservoir pressure to some value; open system which has opening passage between coal reservoir and open air and expanding energy of gas and standing water pressure keeps the reservoir pressure to some value; and between them, there is a medium kind called semi-open system which has such passage but closed.

3. Diffusion, which is caused by the difference of free gas content between coal reservoir and cap, is one of the important dissipation of CBM in geological history and it has the most strong character of continuity. The long-time lasting geological history makes this slow action more effectively. Small diffusive coefficient, thick cap, low free gas content can slow down the speed of CBM diffusion, and the enclosement of hydrocarbon content among neighboring coal seams can also reduce the affection of diffusion.

4. Cap outburst may happen in condition of extremely high reservoir pressure in close system. When it take place, gas flow through micro-fracture of cap formed in high reservoir

pressure and dissipate from coal reservoir. Whether it happen or not depends upon the concentration degree of gas, reservoir pressure, bury depth, cap rock's tensile strength and character of tectonic stress field. Only in open system can vadose dissipation take place, another important condition is enough reservoir pressure gradient. Gas permeability flow in cleat system or opening fracture. Both cap outburst and permeability dissipation is much more faster than diffusion but the dissipation quantity of gas is lower than diffusion generally.

5. Evolution of CBM in geological history can be divided into three periods, that is, primary, peak and dissipation period. In primary period, dynamic equilibrium factors includes gas generation, free and adsorptive gas and diffusion dissipation. All above factors keeps in low level because of low gas generation or low degree of organic matter maturation. In peak period, dynamic equilibrium factors includes gas generation, free and adsorptive gas, diffusion dissipation and may also cap outburst and permeability dissipation. In this period, coal organic matter generates large amount of gas which can make the reservoir pressure extremely high and cap outburst or gas permeability may happen. According to the degree of gas generation and kinds of dissipation, this period can be divided into three type. Dissipation period begin when peak period end or organic material stops gas generation. Dynamic equilibrium factors includes free and adsorptive gas and diffusion dissipation. The simple CBM evolution model means that primary period, peak period and dissipation period emerge one after another up to now. Complex model means that there are two or more than two peak period and dissipation period in geological history.

6. Concentration and enrichment degree of CBM in geological history depend upon its evolution history and geological condition. CBM strongly concentrate in peak period, always in dissipation condition in dissipation and, may concentrate or dissipate in low level in primary period. High gas concentration in peak period, weak dissipate and short time - lasting of dissipation period can make CBM in a high enrichment, but in complex model, this is more for the last one.

7. The upper main coal seam of late Paleozoic Earthem in the middle of QinShui coal field belongs to the simple model of CBM evolution history. Primary period lasted form coal seam formed to late middle Jurassic Period and peak period took place between late Jurassic and early Cretaceous Period at which not only large amount of gas concentrated but cap outburst and permeability took place also. Dissipation period lasted form late Cretaceous Period up to now, the long dissipation time resulted in most gas escaped from coal reservoir and low enrichment degree of CBM. The highest gas content in the region now is lower than $15\text{m}^3/\text{t}$, and in the state of under - saturation.

8. Mathematical simulation is an effective method for CBM geology study because of its advance of highly quantitation. To conduction a mathematical simulation research on CBM evolution, four steps must be undergone, that is, basic work, building geological and mathematical model, calculation and results analysis.

目 录

1 研究基础	(1)
1.1 国内外研究现状及文献综述	(1)
↓ 1.1.1 煤层甲烷研究及开发现状	(1)
1.1.2 煤层甲烷生成、运移、聚集及相关学科研究现状	(2)
1.1.3 煤层甲烷数值模拟研究现状	(4)
1.1.4 评述	(5)
1.2 煤层甲烷地质演化史数值模拟研究的思路和方法	(6)
2 煤层甲烷地史演化地质模型	(8)
2.1 生烃子模型	(8)
2.1.1 煤层有机质类型、丰度、有机质成熟度及生烃	(9)
2.1.2 煤化作用进程的影响因素	(10)
2.2 储层特征及脱吸附子模型	(11)
↘ 2.2.1 煤储层物性特征及煤层甲烷的赋存	(11)
2.2.2 储层压力、外部应力及其意义	(12)
2.3 煤层甲烷运移子模型	(14)
2.3.1 煤层甲烷的垂向运移	(14)
2.3.2 煤储层内的流场	(15)
2.4 煤层甲烷聚散子模型	(16)
2.4.1 煤层甲烷生、运、聚、散演化过程中的物质平衡	(16)
2.4.2 煤层甲烷的聚集和富集	(17)
2.5 煤层甲烷生成、运移、聚集及散失动态平衡动力学地质模型	(18)
3 煤层甲烷地史演化数学模型	(20)
3.1 扩散和渗流运移物质平衡方程	(20)
3.1.1 盖层中的扩散及费克定律	(20)
3.1.2 煤储层中的渗流连续方程	(21)
3.2 各种地质参数讨论	(25)
3.2.1 煤层和煤质定量表述	(25)
3.2.2 煤层有机质生气量	(26)
↘ 3.2.3 煤储层参数定量表述	(27)
3.3 动态平衡过程的数学表达	(41)
3.3.1 区域生气量及散失量	(41)
3.3.2 煤层甲烷地质历史演化过程动态平衡数学表达	(43)
3.3.3 流体的 PVT 性质	(44)

3.4 煤层甲烷生成、运移、聚集及散失动态平衡动力学模型的数学表达	(44)
3.4.1 基本参数	(44)
3.4.2 生烃子模型	(45)
3.4.3 脱吸附及储层物性特征子模型	(45)
3.4.4 运移子模型	(46)
3.4.5 聚散子模型	(46)
4 煤层甲烷生成、运移、聚集及散失地质历史演化数值模拟研究	(47)
4.1 煤层甲烷扩散运移数值模拟	(47)
4.1.1 数值模型	(47)
4.1.2 不同地质条件下游离甲烷扩散散失作用数值模拟研究	(49)
4.1.3 讨论及小结	(66)
4.2 封闭体系储层压力及盖层突破数值模拟	(67)
4.2.1 封闭体系储层压力	(68)
4.2.2 盖层突破与甲烷的逸散	(69)
4.2.3 小 结	(71)
4.3 煤储层割理孔隙率数值模拟	(72)
4.3.1 割理孔隙率的控制和影响因素	(72)
4.3.2 小 结	(74)
4.4 煤层甲烷渗流运移数值模拟	(74)
4.4.1 数值模型	(74)
4.4.2 模拟运算结果及讨论	(79)
4.4.3 讨论及小结	(86)
4.5 本章小结	(88)
5 研究实例	(89)
5.1 基础地质及煤层甲烷地质	(89)
5.1.1 地层	(91)
5.1.2 煤层及煤质	(91)
5.1.3 煤储层及盖层物性特征	(92)
5.1.4 地质构造	(95)
5.1.5 地质演化史	(95)
5.2 地质模型及数学模型	(98)
5.2.1 地质模型	(98)
5.2.2 数学及计算机模型	(98)
5.3 煤层甲烷演化史	(100)
5.3.1 时间演化特征及演化阶段	(101)
5.3.2 全区阶段演化特征	(103)
5.3.3 全区统计结果	(114)
5.4 讨论及小结	(115)
6 煤层甲烷地质历史演化及富集规律探讨	(117)

6.1 煤层甲烷地质历史演化模式探讨	(117)
6.1.1 煤层甲烷地质历史演化的阶段性	(117)
6.1.2 地质历史中煤层甲烷的聚集	(119)
6.1.3 煤层甲烷地质历史演化模式	(120)
6.2 煤层甲烷富集规律探讨	(121)
6.2.1 各种地质因素对煤层甲烷富集作用的影响	(122)
6.2.2 地质历史演化过程对煤层甲烷富集的影响	(123)
6.3 煤层甲烷地质演化史数值模拟研究方法论	(125)
6.3.1 基础工作	(125)
6.3.2 建立地质模型及数学模型	(126)
6.3.3 模拟运算	(127)
6.3.4 计算结果整理和分析	(127)
6.4 评 述	(127)
6.4.1 煤层甲烷地质演化史数值模拟研究的意义	(127)
6.4.2 煤层甲烷地质演化史数值模拟研究展望及今后工作方向	(128)
7 结 论	(130)
7.1 建模工作——提出了一套描述煤层甲烷地质历史演化过程的地质模型和数学模型	(130)
7.2 理论模拟——揭示了煤层甲烷地质历史演化的基本特征和基本规律	(131)
7.3 实例研究——首次实现了研究区煤层甲烷地质历史演化过程的定量模拟及预测	(132)
7.4 综合分析——总结了煤层甲烷地质历史演化的过程特征及其聚集和富集规律	(132)
7.5 方法论研究——提出了煤层甲烷地质历史演化过程数值模拟研究方法	(133)
附录:主要符号说明及单位	(134)
参考文献	(136)

1 研究基础

本章通过叙述相关学科的发展现状、研究水平及其所取得的主要成果,分析它们对煤层甲烷地质历史演化数值模拟研究的意义。以此为基础,提出煤层甲烷地史演化数值模拟研究的目的、内容、基本思路和方法。

1.1 国内外研究现状及文献综述

进行一项科学研究,必须首先了解相关学科领域的状况,只有这样才能抓住重点,正确、科学地选定研究的方向和内容,采取正确的方法和技术路线,取得具有理论意义和实用价值的成果。

1.1.1 煤层甲烷研究及开发现状

世界能源正朝着多元化方向发展,煤层甲烷(Coalbed methane)的开发越来越引起人们的重视。煤层甲烷是一种非常规天然气,它既是高效、洁净的能源和化工原料,同时又是煤矿生产的一个重大安全隐患,采煤工业排出的瓦斯气体同时还是环境污染的重要因素之一。国内外煤炭、地质及石油等行业对其进行了大量研究。

目前,美国的煤层甲烷勘探开发处于世界领先地位,有数家矿业、石油公司在 San Juan、Black Warrior、Piceance、Laton 及 River 等含煤盆地进行了商业性开发,美国人不但对煤层甲烷开发工程和工艺进行了大量研究,如 1975~1977 年在 San Juan 盆地 Oak Grove 井田进行的示范性煤层甲烷地面开采工程项目^[1];在基础研究方面也取得了非常多的成果,如煤层有机质生烃机理,煤储层物性及影响因素研究,生产井甲烷运移、产能分析、实验室分析测试技术以及商业风险分析等^[2]。早在 1994 年,美国煤层甲烷产量已达到 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。世界上其他国家如加拿大、澳大利亚、俄罗斯、新西兰等也在一定程度上开展了这方面的工作,不但对其进行地质评价,局部地区还实施了试验性开发工程。

我国是一个产煤大国,煤层甲烷资源非常丰富。本世纪 50 年代即开始从煤矿安全的角度进行矿井瓦斯抽放理论研究和实践工作。60 年代到 70 年代,一些高瓦斯矿区抽放出来的瓦斯气体即已投入小规模民用及工业利用。80 年代初期,国内开始进行煤层甲烷相关资源研究。“六五”期间,煤炭、石油以及地质等行业通过国家重点科技攻关项目对国内煤成气资源进行区域性评价及基础理论研究^[3],如李明潮等^[4]对一些主要煤田煤成气资源的研究,从生、储、盖、地史、构造史以及瓦斯地质等方面对我国一些主要煤田煤成气资源赋存状况进行了较全面论述。“七五”期间,各有关行业专门立项,进行煤层甲烷资源评价及有关基础理论研究,如张新民^[5]论述了我国煤层甲烷地质背景和生、储、盖条件及富集条件,进行了局部资源量计算。与此同时,国外关于煤层甲烷的大量文献资料被翻译、介绍到国内,我国主要煤田地质刊物如《煤田地质与勘探》《中国煤田地质》等纷纷设立专栏,介绍煤层甲烷基础理论、工作方法等,同时《煤层气》《中国煤层气》等专业杂志也于 90 年代初创刊。“八五”期间,资源评价工作继续进行,如刘焕杰等^{[6][7]}在山西南部所作的工作,不但进行了生、

储、盖等常规研究,还对该地区的构造演化史、煤有机质成熟生烃史等进行了半定量研究。而在此时,煤层甲烷研究工作重点转移到了对开发工艺攻关上^[8]。到目前为止,国内已进行了多处选区试井开发试验,煤炭、地矿、石油等部门以至地方政府和外国公司都参与了这项工作。现在,煤层甲烷试井近百口,单井产量不等,最高达 7 000 m³/d,但仍未取得实质性进展,主要是产量稳定性问题。美国在过去 30 年间发展起来的一套经验,是否适合中国的地质条件,是一个令人深思的问题。唐修义^[9]指出:应该加强对煤层甲烷开发前景的评价,尤其是要加强对煤层结构、孔隙与裂隙、煤对甲烷的吸附—解吸性能、气体在煤储层内的运移特征和产能影响因素等的研究。总而言之,在过去近 20 年间,我国煤层甲烷开发取得了长足进步,但也存在很多问题,仍有待于进一步研究和解决。

1.1.2 煤层甲烷生成、运移、聚集及相关学科研究现状

煤层甲烷在地质历史及生产过程中的运移机理问题,目前已进行了很多研究,取得了大量的成果。此类成果来自煤层甲烷研究者、油气地质工作者、煤矿瓦斯研究者的贡献。

目前普遍认为,煤储层是一种具有双重孔隙系统的特殊储层,它由裂隙(fracture)及被裂隙分割的基质块体(matrix)两个部分构成。基质块体中存在大量孔径不等的微孔隙,甲烷主要以吸附形式赋存于这些微孔隙之中,所以它们是煤层甲烷的赋存空间。吸附是煤层甲烷最主要的赋存形式,其他形式还有游离态和水溶态,但所占的比例相对较低。裂隙则是甲烷等流体的运移通道,在一定条件下,煤层甲烷从基质块体中解吸出来,经扩散进入裂隙系统,并在压力梯度的作用下发生运移。

上述提法在大量文献资料中出现,如 Waller^[11]、Saulsbery^[10]、关德师^[11]、张新民^[5]及王大曾^[12]等的文章或书籍。他们还同时指出:煤层甲烷在基质块体中的吸附与解吸遵循朗格缪尔方程(Langmuir equation),在基质块体中的扩散遵循费克定律(Fickian law),而在裂隙系统中的运移则为多孔介质中的渗流是遵循达西定律(Darcy's law)。周世宁^{[13][14]}也有类似的见解。值得一提的是,丁广骥^[15]认为瓦斯的解吸可以视为容器内气体排空过程,从而将由于引入费克定律而变得复杂化的传质问题得以简化。

必须提出,在过去数十年中油气地质学界在油气运移研究方面所取得的大量成果对煤层甲烷生成、运、聚地质历史演化研究具有极大的参考价值,许多油气地质学论著均不同程度地涉及到这个问题,如 Tissot^[16]、Висосянц^[17]、潘钟祥^[18]、陈荣书^[19]、李明诚^[20]及郝石生^[21]等。研究者们将油气运移划分为初次运移(primary migration)和二次运移(secondary migration)两种形式。其中,初次运移指油气自生油(气)层向其以外的储集层或疏导层的运移(实际上类似于煤层甲烷的散失过程)。他们详细地分析研究了初次运移相态、动力、运移模式等。李明诚^[20]将初次运移相态划分为水溶相、游离相、油溶相及扩散相等,且指出运移动力主要为压实(包括正常压实、欠压实和过压实)、水热作用、粘土脱水、渗流、扩散及构造运动等。郝石生^[21]指出,天然气的初次运移包括扩散、渗流,同时还提出了脉动式混相涌流的观点。

扩散是天然气重要的运移作用之一,在这方面也有很多研究成果。Leythaeuser^[22]、李国平^[23]以及前述的研究者,详细地研究了扩散作用机理、规律、扩散参数(如扩散系数)实验室测定及其影响因素等等。特别是 Leythaeuser^[22]的研究成果表明,尽管自然界物质扩散传质作用的速度极为缓慢,但考虑到地质历史中时间因素的作用,其对天然气运移散失过程仍具有较大的影响。在天然气的聚集和保存方面,上述和未提到的研究者亦有大量研究成果。

自 1815 年 White 提出背斜学说到 1934 年 Mc Collough 提出“圈闭”这一名词,及至后来不同的圈闭类型如地层、构造、水动力、复合圈闭等的提出,油气聚集理论逐渐发展并不断完善。此外,在油气有机地球化学、有机质成熟演化生烃、储层、盖层等方面的研究均取得了很大进展。

李思田等^[25]指出,沉积盆地模拟包括盆地充填演化和沉积层序模拟、盆地构造和沉降机制模拟(包括构造与油层、沉降和综合模拟分析)、热体制和有机质热演化模拟、油气生成—运移—聚集过程模拟、储层不均一性模拟等等,这一论述反映了目前含油气盆地模拟分析的现状。

模拟分为实验室模拟和数值模拟两种。国内外研究者如 Висосаяц^[17]、Levine 等^[26]、Tissot 等^[16]、傅家谟^[28]、李明潮等^[4]对腐植煤这种Ⅲ型干络根进行了大量实验室研究工作。煤层在煤化作用过程中的生烃模拟研究已达到很高的程度,不同显微组分、不同煤化程度或不同有机质丰度的煤层,其生气量均可较为精确地计算出来^[29],这是实验室模拟最重要的成果之一。另一个重要成果是煤层甲烷在煤储层中的脱吸附性能、煤基质及割理孔渗特征以及气—水或多相流体相互作用特性的研究。在这方面,Arri^[30]研究了二元气体的吸附特性,研究者如 Gash 等^{[31][32]}、Puri 等^{[33][34]}、Law 等^[35],则分别研究了煤储层割理绝对渗透率、气—水相对渗透率等参数的特性、相互关系及围压、储层压力、割理频率等因素对它们的影响,取得了大量数据资料和定量、半定量的成果,且形成了一系列实验室分析测试技术。

油气运移数值模拟研究方法是与本次研究工作关系最大的部分。基于压实作用孔隙率下降使烃源岩中含油饱和度超过临界排油饱和度的原理,Welte^[35]对盆地排油事件进行模拟研究。Ungerer^[36]提出的二维盆地模拟系统则将盆地热史、生烃史、油气运移史等结合起来进行模拟研究。其油气运移部分(包括初次运移和二次运移)均主要根据达西渗流的原理进行。李明诚^[20]提出的模型与 Ungerer 相似,但特别考虑了多相条件如气、水等的排出量、扩散运移、聚集量等。庞雄奇^[37]综合了盆地地史、热史、生留排烃史等,对前人成果进行了改进,建立地质及数学模型并进行实际模拟研究。陶一川等^[38]和范士芝等^[39]利用垂向压实平衡原理,推演烃类运移地质及数学模型,以此研究地史时期地质流场特征。郝石生等^{[21][24]}建立的天然气运移动态平衡模型,除了考虑天然气扩散机理和过程特征、混相涌流的新排烃机制外,还将生烃、排烃、二次运移及散失等子模型相结合,形成天然气运移、聚集散失的动态平衡模型。油气田断层构造定量模拟研究是一个难度极大的工作,郝石生等^[21]利用逻辑信息判别法及非线性映射分析法等新颖的研究方法,对断层的封闭性进行了半定量性质的探索。

煤矿瓦斯工作者从安全生产角度出发,发展了一套煤矿瓦斯运移的数值研究方法,如周世宁^[40]及 Durucan^[41]等对煤矿瓦斯运移问题作了大量研究。袁崇孚等^[42]曾依据某地的瓦斯地质特征,建立瓦斯运移地质和数学模型并进行解算,解决了其瓦斯地质上的一些难题。其他研究者如丁广骥^{[15][43]}系统论述了煤矿瓦斯运移的动力学问题及其流体力学特征,并给出了有关问题的有限单元解算方法。何学秋^[44]、罗新荣等^[45]不但研究了瓦斯运移问题,还详细研究了煤中的裂隙、含瓦斯煤岩形变、流变及煤层孔渗特性。

煤层甲烷运移可以认为是煤体、煤体中的甲烷和水在自身及外界条件作用下发生的自然地质过程,因而要提到水文地质这个领域。罗焕炎等^[46]系统阐述了不同介质中、不同类型地下水流状态及数值研究方法,特别是他们对岩块不透水或近似不透水、裂隙透水且可变

形这种与煤储层极为相似的地下水渗流场的数值模拟研究,对于本书的研究具有重大意义。金安信等^[49]研究了煤层地下水无补给承压水和有越流完整井非稳定运动,求取水文地质参数,以此指导煤层甲烷生产井气体采排工程。

地球物理学方法是地质勘探工作的有力手段,大量运用于理论和实际研究。在油气地质中,定性、半定量的研究成果很多,如前述的李国平^[23]、郝石生^[21]等所作的工作。牟永光^[48]利用所建立的储层地球物理模型,反演储层孔渗参数,其成果达到了很高的水平。在国外,Olszewski^[49]利用测井资料与实验室测试相结合的方法,研究物探资料与煤储层含气性、物性等的关系,用以进行煤层甲烷的地质预测,这类工作在国内尚未见报道。从今后地质研究及勘探工作发展方向来看,地质与物探相结合是必然的结果,煤层甲烷地质亦应如此。

煤田地质学是煤层甲烷地质最重要的基础,任何煤层甲烷地质研究都需要运用煤地质学基本理论和方法。煤化作用与煤层甲烷地质演化过程关系最大,是对煤层甲烷地质演化过程影响最深的煤地质学基础理论之一。不仅煤层甲烷的生成与煤化作用程度有关,前面提到的研究者如张新民^[5]及 Law 等^[35]的成果还表明,煤储层的物性特征等也受到煤化作用的控制和影响。而作为一门博大精深的学科,煤田地质学也在发生改变,煤层气的内容也已出现在煤田地质学有关论著^[50]中。

最后简单地涉及建模、数值方法及其计算机解算方法等问题。一个模型的建立涉及到复杂的科学技术哲学问题^[51]。首先需要认识到研究对象是一个系统,即“相互关联、相互制约的和相互作用的一些部分组成的具有某种功能的组合”^[52]。包括煤层甲烷在内的地质流体运移过程是一个复杂的动态系统,再加上人们难以观察到的地质历史中所发生的事件,科学技术哲学中的模型化原则^[51]才被广泛应用于各种地质流体演化的研究之中。一个模拟地质历史中流体生成、运移的模型,应该是尽可能近似(只能是近似)地反映整个系统的动态变化过程,包括反映内因和外因自身的特性、变化规律及其间的相互作用关系等。在地质模型或物理模型的基础上建立的数学模型就是运用数学语言来表述整个系统的属性。通常,这类模型是动态的解析模型或数值模型,前者能用古典分析数学方法来解算,而后者大多是以偏微分方程的形式来表达,必须以数值算法进行近似解算。偏微分方程的数值解法包括有限差分法和有限单元法等,它们都需有一定的边界条件、初始条件,通过单元剖分,再以某种方式逐一进行近似,形成线性或非线性代数方程组,最后求出方程的近似解^{[53][54]}。从方法论的角度出发,还有正演和反演的问题,正演是指直接求解微分方程,反演则是由已知的结果反求未知的参数^[15]。上述方法最大的特点是计算工作量巨大,必须以电子计算机来代替人力进行解算。计算通常使用 FORTRAN77 算法语言,采用结构化的程序设计方法,它具有直观、易掌握、可读性和软件维护性较强等特点^[55]。Forsythe^[56]、Plays^[57]等,对大量数学问题提出了可行的算法及相应源程序,可直接运用。

1.1.3 煤层甲烷数值模拟研究现状

目前,美国仍处于煤层甲烷数值模拟研究领域的领先地位,数值模拟方法被广泛应用于其煤层甲烷资源量计算、生产井产能、储层物性的现场及实验室模拟研究等方面^[58]。在煤层甲烷资源量分析、计算方面,King^[59]利用物质平衡法,结合生产井前期产能变化史及有关参数,建立计算生产井原始气体资源量及产能、生产史的模型。Richardson^[58]利用模拟方法结合常规容积法提高储量及产能评估精度等。

储层模拟器是煤层甲烷数值模拟研究的重要成果之一。目前,美国常用的储层模拟器有:COALGAS、SABRE、SHALEGAS及COMETPC等^[60],前三者是S. A. Holditch & Associates Inc.的产品,后者则由ICF-Lewin推出。它们均为已成型的软件包,是在地质模型和数学模型基础上生成的计算机程序再经适当包装后形成的。上述软件既能定量地确定或预测煤层甲烷生产井的气—水产出量、产出历史如上升期、高峰期及衰减期等,又能确定井位、井网分布。其功能较为强大,既可进行一维、二维、三维及气、水、油单相、两相、三相的模拟,也可以对单井、多井进行模拟。

现以COALGAS为例说明其基本原理。首先建立地质模型,如煤储层特性界定、煤层甲烷产出机理等。再根据地质模型建立数学模型,数学模型的核心是依据煤层甲烷在基质块体中扩散所遵循的费克定律及在割理系统中渗流遵循的达西定律形成的气、水、油等流体物质连续偏微分控制方程(PDE)或方程组,进一步采用显式、隐式法或以二者相结合进行有限差分求解或进行有限单元求解,形成线性、非线性方程组,进而解算出控制方程近似解。在模型求解过程中,使用了储层参数(如割理孔渗特性参数、原始气含量、脱吸附特性参数、煤体形态)、流体的PVT参数、井筒特性参数(如井底压力、井筒表皮系数及压裂裂缝半长)及其它参数(如时空步长)等。该模拟器对上述参数还具有手动调控及程序自动调控功能。

上述模拟器广泛应用于美国的煤层甲烷生产中,为其煤层甲烷勘探开发和生产作出了很大贡献。除此之外,Seidle等^[61]利用常规储层模拟器Black Oil模型和COMETPC储层模拟器对单井三维和多井的研究证明,二者之间虽有一定差异,但对生产井特性模拟同样具有可行性,而且对多井情况,Black Oil模型具有更强的灵活性。

目前,我国的一些教学和科研单位如煤炭科学研究总院西安分院、中国石油天然气总公司石油天然气开发研究总院廊坊分院和中国矿业大学资源与环境科学学院等都花费巨资从美国引进了上述储层模拟器中的某一种并应用于实际工作中。如李明潮等^[8]在河北大城地区大参1井试井过程中,就使用了COALGAS储层模拟器进行产能、生产史研究。目前我国也自行研制了储层模拟器,洛祖江^{[62][63]}建立了煤层甲烷生产井运移的地质、数值模型及计算机求解CBMRS模型,并成功地对某煤层甲烷生产试验井的产能特性进行了模拟,这对于我国煤层甲烷开发研究来说具有重大的意义。

在对近期文献资料进行检索之后发现,与大量的油气生、运、聚、散地质历史模拟研究及煤层甲烷生产工程数值模拟研究文献资料相比,对煤层甲烷在地质历史中的演化特别是煤层甲烷运、聚史等的研究,大多是定性文字描述。

1.1.4 评述

对上述成果进行分析,不同领域的模拟研究在过程上均有相似之处。即根据对地质条件或现场实际情况详尽的分析研究,建立整个过程的地质或物理模型;在数学模型中,需要建立对于一个流体演化数值模型的流体演化过程PDE连续性控制方程,并围绕PDE方程参数,研究并建立有关子模型及边界条件和初始条件,进而用数值计算机方法或正演、或反演解算流体流场特性或流场介质特性。其工作方法和思路均值得借鉴。对于不同类型的模型,由于研究对象或研究目的不同,考虑因素、侧重方面也不完全相同。因此,在学习、借鉴的同时,还要详细分析它们是否适用于煤层甲烷地质历史演化过程的模拟研究。

油气地质尤其是天然气地质中的流体演化模型,其研究对象为常规气藏,考虑了生烃及排烃或初次运移及二次运移,以及天然气在圈闭中的聚集、保存、散失和破坏等过程。可借