

低渗透煤层气开采 理论及其应用

梁 冰 孙可明 著



科学出版社
www.sciencep.com

低渗透煤层气开采理论 及其应用

梁 冰 孙可明 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书根据国内外大量煤层气生产和科研资料,结合作者近期的科研成果撰写而成。书中系统地阐述了低渗透煤层气开采与注气增产流固耦合理论及应用。全书共分七章。第一章主要介绍了低渗透煤层气开采和增产理论的研究背景、煤层气开采理论和储层模拟技术以及注气开采煤层气增产技术的国内外研究现状;第二、三章叙述了低渗透煤层气流固耦合渗流基本概念及基本力学定律,以及煤层气的储层特征和储集、运移及产出机理;第四章至第六章详细地阐述了低渗透煤层气开采与注气增产流固耦合理论、储层数值模拟技术及其应用;第七章主要对流固耦合作用下的低渗透煤层气开采与注气增产的数值模拟规律进行了总结。

本书可供从事煤层气开发的工程技术人员和科研人员以及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透煤层气开采理论及其应用/梁冰,孙可明著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-016605-1

I. 低… II. ①梁…②孙… III. 煤层-地下气化煤气-地下开采 IV. P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 146073 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:耿 耘

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 4 月 第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2006 年 4 月第一次印刷 印张:10

印数:1—1 500

字数:160 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

煤层气是一种由煤层生成并主要以吸附状态储集于煤层中的非常规天然气,是近 20 年来崛起的优质洁净新能源。其开发与利用对弥补我国常规能源的不足,从根本上消除煤矿生产中造成的瓦斯爆炸、瓦斯突出等灾害,减少大量瓦斯排放造成的环境污染以及改善我国的能源结构,加速我国以煤为主的能源系统逐渐向环境无害化的可持续发展模式的转化过程,形成洁净能源新产业,均具有重要的战略意义。

中国不仅是煤炭资源大国,而且煤层气资源也极为丰富,我国政府和有关工业部门高度重视煤层气的勘探开发,在引进、消化、吸收国外煤层气开发经验的基础上,煤层气勘探开发理论与技术等方面也取得了一定的进展。但迄今为止,从全国总的试验情况看,绝大多数煤层气试井产量低、产量递减快,难以形成稳定的工业性气源。其主要原因是我国煤层普遍渗透率低、吸附强、开采浅层煤层气的原始压力不高、解吸速度慢,使得煤层气解吸及其在煤层中的运移十分困难,而且低渗透煤层甲烷吸附、解吸、扩散、渗流运移过程表现出相互制约和非达西渗流以及煤层甲烷运移受排采降压引起的流固耦合作用较明显的突出特点。反映优良储层特性的国外煤层气开采理论和借用常规的油气开采理论,不能完全适应我国低渗透煤层气的开采。目前,煤层气的增产技术普遍沿用油气田开采中的水力压裂提高渗透率方式来提高煤层气的产量,而在促使煤层气产生解吸,使吸附在煤基质孔隙内表面的煤层甲烷尽可能由吸附状态转变为游离状态,扩大煤层气由基质向微孔、向裂隙的扩散能力等增产措施方面研究较少。

本书是笔者根据大量的煤层气资料和近期的研究成果撰写而成的,旨在系统阐述反映适合我国低渗透储层特性的煤层气开采与注气增产流固耦合理论及其应用,为我国低渗透煤层气稳产、增产和实现合理布井及有效预测产能提供理论基础,以推动我国煤层气早日产业化,同时为处理二氧化碳提供新途径。

由于我们的水平有限,不足之处在所难免,恳请读者予以批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1-1 低渗透煤层气开采和增产理论研究背景、目的和意义	1
1-2 煤层气开采理论和储层数值模拟技术的国内外研究现状	4
1-3 注气开采煤层气增产技术的国内外研究现状	7
第二章 低渗透煤层气流固耦合渗流的基本概念及力学定律	10
2-1 引言	10
2-2 多孔介质	10
2-2-1 储容性	10
2-2-2 渗透性	11
2-2-3 比表面积	12
2-2-4 孔隙结构	12
2-3 连续介质场	14
2-3-1 连续流体	14
2-3-2 连续多孔介质	16
2-4 流体的力学性质	17
2-4-1 流体的重量及重力势能	17
2-4-2 流体的质量和惯性力	17
2-4-3 流体的黏度和黏滞力	18
2-4-4 流体的可压缩性	19
2-5 多孔介质力学性质	20
2-5-1 多孔介质的压缩性	20
2-5-2 有效应力原理	21
2-5-3 煤岩应力应变全程曲线	22
2-5-4 煤岩变形破坏机制与强度准则	22
2-6 流固耦合渗流运动学基本概念	25
2-6-1 渗流速度	25
2-6-2 描述流体运动的拉格朗日法和欧拉法	26
2-6-3 物理量的质点导数和局部导数	28

2-7 线性达西渗流规律	29
2-7-1 达西定律	29
2-7-2 达西定律的适用范围	32
2-8 低渗透煤层中的渗流规律	33
2-8-1 低渗透煤层非达西渗流规律	33
2-8-2 低渗透气体渗流的滑脱效应	35
2-9 多相渗流基本知识	37
2-9-1 流体饱和度	37
2-9-2 界面张力和湿润性	38
2-9-3 毛管力	39
2-9-4 相渗透率和相对渗透率	40
2-9-5 低渗透煤层气藏两相流非达西渗流定律	41
2-10 小结	41
第三章 煤层气的储层特征和储集、运移和产出机理	42
3-1 引言	42
3-2 煤层气的储层特征	42
3-2-1 煤的孔隙类型	42
3-2-2 煤的孔隙系统	43
3-2-3 煤层的渗透性	44
3-2-4 煤的内表面积	44
3-3 煤层气储集机理	46
3-3-1 溶解态储集机理	46
3-3-2 游离态储集机理	46
3-3-3 吸附气储集机理	47
3-4 煤层气运移和产出机理	54
3-4-1 煤层气的解吸机理	54
3-4-2 煤层气的扩散机理	55
3-4-3 煤层气的渗流机理	57
3-5 小结	59
第四章 低渗透煤层气、水两相流流固耦合模型及数值解法	60
4-1 引言	60
4-2 基本假设	60
4-3 煤储层双重介质结构	61

4-4 低渗透双重介质煤层气、水两相流流固耦合模型的建立	62
4-4-1 煤层甲烷解吸、扩散和渗流过程的气、水两相流流场控制方程	63
4-4-2 辅助方程和状态方程	65
4-4-3 煤岩体变形场控制方程	66
4-4-4 流场与变形场的耦合媒介	67
4-4-5 流场与变形场的定解条件	68
4-5 低渗透双重介质煤层气、水两相流流固耦合模型的数值 解法	69
4-5-1 割理裂隙系统渗流场的有限差分数值解法	69
4-5-2 基质系统扩散项的有限差分数值解法	78
4-5-3 变形场有限元数值解法	79
4-6 三维双重介质煤层气藏流固耦合模型数值模拟程序设计	82
4-6-1 双重介质的空间离散化网格处理	83
4-6-2 程序设计结构和框图	83
4-7 小结	87
第五章 低渗透双重介质煤层气藏流固耦合理论的应用	88
5-1 引言	88
5-2 新集矿区地质概况	89
5-3 新集矿区储层基本特征	89
5-4 煤层气试验井气水产量曲线	93
5-5 试验区煤储层模拟	95
5-5-1 模拟区域和网格划分及主要参数	95
5-5-2 SX-02 井和 SX-03 试井气、水产能预测	96
5-5-3 单井开采耦合与非耦合储层压力、饱和度、浓度和产能变化 规律	98
5-5-4 两井联合开采耦合与非耦合储层压力等量变化规律及井间 干扰	104
5-5-5 耦合与非耦合引起储层压力等量变化规律差异的机理分析	110
5-5-6 井群开采布井间距对产能等量的影响	110
5-5-7 扩散系数和渗透率对产能的影响	117
5-5-8 启动压力和滑脱效应对产能的影响	119
5-6 小结	121
第六章 注气开采煤层气增产机理的数值模拟及其应用	123
6-1 引言	123

6-2 二氧化碳和煤层甲烷的置换驱替实验	124
6-2-1 样品制备	124
6-2-2 测量仪器	124
6-2-3 实验的主要结果	125
6-3 注气开采煤层气多组分流体流固耦合模型的建立	127
6-3-1 基本假设和气体混合物浓度速度流动物理量的定义	127
6-3-2 基质系统多组分气体的扩散控制方程	128
6-3-3 割理裂隙系统多组分气、水两相流流固耦合模型控制方程	129
6-3-4 辅助方程	129
6-3-5 定解条件	130
6-4 五井布置注气增产机理及规律的数值模拟	131
6-4-1 模拟范围和布井方式及参数的确定	131
6-4-2 储层压力和水饱和度变化规律	131
6-4-3 基质孔隙系统煤层甲烷浓度变化规律	135
6-4-4 基质孔隙系统煤层 CO_2 浓度和裂隙系统 CO_2 饱和度变化 规律	137
6-4-5 注气前后产能的变化规律	141
6-4-6 注气开采煤层气和石油增产机理的主要差异	143
6-5 小结	144
第七章 结论	145
参考文献	148

第一章 绪 论

1-1 低渗透煤层气开采和增产理论研究 背景、目的和意义

煤层气是一种由煤层生成并主要以吸附状态储集于煤层中的非常规天然气,主要成分是甲烷,甲烷一般占 95%~98%,故称之为煤层甲烷,在煤矿中又俗称为瓦斯^[1],是近 20 年来崛起的优质洁净新能源,逐渐从研究走向开发利用阶段。我国煤层气资源极为丰富^[25,26,31,32,54,63,64],据测算,其资源量约 $43 \times 10^{12} \text{ m}^3$,与天然气的资源量大约相等;依据迄今为止最完整的煤炭资源勘探成果和煤层含气量实测资料,含气量 $4 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上、埋深小于 2 000 m 的煤层气资源总量为 $14.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中含气量大于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 的富甲烷煤层气资源量 $12.44 \times 10^{12} \text{ m}^3$,含气量介于 $4 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间的含甲烷的资源量 $1.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$;埋藏深度小于 1 500 m 的浅层的煤层气资源量 $9.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$,深度为 1 500~2 000 m 的较深层煤层气资源量 $5.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,且大部分分布于西气东输管运沿线,开发利用前景巨大^[2]。

我国是煤炭工业大国,过去绝大部分煤层瓦斯随煤炭开采被排放到大气中。根据联合国的一份调查报告,我国煤矿在开采过程中每年向大气排放甲烷总量大约 $194 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占世界采煤排放甲烷总量的 1/3,这样不仅浪费资源而且恶化人类的生存环境。美国环保局 1987 年关于煤层甲烷的排放对环境影响的研究表明, CH_4 的温室效应是 CO_2 的 20 多倍,对臭氧层的破坏是 CO_2 的 7 倍,而且排放到大气中还含有甲烷的同系物 NH_3 、 H_2S 和 SO_2 等。另外煤层甲烷是煤矿井下发生瓦斯爆炸和瓦斯突出的根源^[4,5]。据统计,1950~1990 年我国发生煤与瓦斯突出事故 1.5 万余次,约占世界瓦斯突出事故的 40%,历年因瓦斯事故死亡的人数为世界总死亡人数的 30%~40%。仅 1983~1994 年间,我国就发生瓦斯事故 675 起,死亡 4571 人,直接经济损失 150 亿元,近年来煤矿

因瓦斯事故造成生命与财产损失更为严重^[3]。

随着我国经济的快速发展,能源短缺的矛盾进一步加剧,近年来煤层气受到我国政府和有关工业部门的高度重视,煤炭工业“十五”规划中确定要大力发展煤层气产业,实行地面开发和井下抽放并举的煤层气开发方针,重点加快山西沁水,安徽两淮,辽宁铁法、抚顺矿区,贵州六盘水等地区煤层气的勘探评价及开发,2005年,大中型煤矿瓦斯利用量达到当年抽放量的80%,建成2~3个煤层气地面开发及利用示范基地,煤层气产量达到 $30 \times 10^8 \sim 40 \times 10^8 \text{ m}^3$,积极支持煤层气产业发展,使其成为煤炭工业新的经济增长点^[4,5]。因此,煤层气将成为我国继煤炭和石油天然气之后的战略性的接替能源,它的开发和利用既能解决我国天然气的不足,又能从根本上消除煤炭开采中造成的瓦斯爆炸、瓦斯突出等灾害,还可以减少大量瓦斯排放造成的环境污染以及改善我国的能源结构,加速我国以煤为主的能源系统逐渐向环境无害化的可持续发展模式的转化过程,树立遵守国际公约和减少大气污染以及保护国际环境的良好国际形象。

美国是首先在地面钻井开发煤层气技术方面获得重大突破并进入商业化开采的国家。1953年圣胡安盆地第一口煤层气试验井开始投产,1978年美国能源部开始实施甲烷回收计划,1980年黑勇士盆地煤层气开发区建成投产,1996年煤层气产量极高的圣胡安盆地的110口煤层气井日产量达660多万 m^3 ,2000年美国年煤层气产量占天然气总量的15%。这些事实说明煤层气井的产量相当高,煤层气在能源中的地位正日益提高。

在20世纪60年代我国华北石油局开始从事煤层气地质方面的研究,70年代对煤层气资源进行初步评价,80年代至90年代初期,煤炭、地矿、石油系统及地方政府有关单位先后独立或与联合国及国外石油公司合作开展了煤层气的开发试点工作,据不完全统计,已施工的约200口煤层气实验井,部分钻井进行了煤层压裂、排水产气试验,在煤层气勘探开发理论与技术等方面取得了重要进展。但迄今为止,从全国总的试验情况看,除沁水煤田产气量达到商业产气要求外,绝大多数煤层气试井产量低、产量递减快,难以形成稳定的工业性气流。其主要原因

如下^[6~11]：

(1) 我国煤层气储层受自身特性的限制,即煤层气藏的渗透率低、吸附强、开采浅层煤层气的原始压力不高、解吸速度慢,使得煤层气解吸及其在煤层中的运移十分困难。

(2) 适合于我国复杂地质条件下煤层气储层特征的储层评价技术和方法以及钻井、完井、压裂和排采等核心技术不够完善。

(3) 适合我国煤层气储层特性的煤层气开采理论和提高低渗透煤层气产量措施不够完善,因为煤层气专家不完全熟悉天然气开采,天然气专家不完全熟悉煤层气的开采(常规天然气主要是游离气,而煤层气是以甲烷为主的吸附气),外国专家又不完全熟悉中国致密低渗透储层特征。目前,我国关于煤层气的绝大部分基础理论主要是从常规的天然气开采理论中借用的,不能完全适应煤层气的开采。

国外煤层气开发实践证明,钻井技术、煤层气增产技术(压裂、注气和割缝等)和储层模拟技术是煤层气开发中的三大关键技术^[59,60]。在增产技术方面,目前采用压裂提高渗透率和注水驱气的方式来提高煤层气的产量,但往往是压裂后初始产气量有所增加,但很快产气量就衰减,因此仅靠提高渗透率增加低渗透煤层气的产量存在局限性;注水驱气也有一定的弊端,因为水分子直径大于储存大量瓦斯基质系统中大部分微孔直径而难以进入基质的微孔内,对提高煤层气的解吸和扩散效率有一定的局限,尤其对低渗透煤层更为突出。因此,从煤层气吸附、解吸性能入手,国外已把燃煤电厂和其他排放源产生的二氧化碳注入作为煤层气增产的一项重要措施^[12,14],从经济效益、社会效益和环保效益方面全面论证注气开采煤层气是完全可行的,而且实施效果非常好,但在我国还尚属空白。煤层气储层数值模拟是研究煤层气储集、运移和产出规律和确定煤储层特征、煤层气井作业制度与煤层气产量之间关系的有效手段,可为煤层气资源开发潜力的评价和开发方案的优化提供科学依据。煤层气作为一种非常规天然气,其储层与常规石油天然气储层比较具有一些独有的特点:储层为煤、气、水三相共存;由微孔隙和天然裂隙组成的双重孔隙系统,微孔隙系统非常发育,吸附能力强;煤层气的运移包含吸附、解吸、扩散和渗流复杂过程。因此煤层气储层数值模拟不能照搬常

规油气藏数值模拟的技术。另外,目前的 Fluent、Phoenix、Cd-star、Cfx 的 CFD 软件和多物理场 Abaqus、Ansys 等通用 FEM 软件不能模拟煤层气在多孔介质中解吸、扩散和渗流运移过程,因此煤层气储层模拟必须开发出专门软件;目前国内从美国引进的几套简单地质条件反映优良储层特性煤层气模拟软件,仅仅是个可执行文件,同时也不支持二次开发,不能较好适用我国复杂地质条件下低渗透强吸附储层特性,因此进一步加强低渗透储层条件下煤层气开采和注气增产理论及储层模拟研究具有重要意义。

1-2 煤层气开采理论和储层数值模拟技术的 国内外研究现状

煤层气开采的理论基础是瓦斯在煤层中赋存和运移的理论^[1]。对煤层甲烷在煤层中的赋存和流动规律,主要有渗流理论、扩散理论、渗流扩散理论和章梦涛、梁冰和赵阳升的单相流、单孔隙度平衡吸附耦合模型等^[15~17]。对于煤层甲烷赋存运移机理及其动力学模型的研究,国内外的学者已开展了深入的研究,得出很多模型,目前模型大体可分为三种类型^[18,19]:吸附/扩散模型、组分模型和黑油模型。吸附/扩散模型分为经验吸附模型、平衡吸附模型和非平衡吸附模型。经验模型是储层数值模拟原始阶段的产物,此类模型有 Airey 第一模型、下降曲线模型等。尽管经验模型相对简单,输入参数少,但是它们缺少详细预测所需要的理论上的严密性。20 世纪 80 年代末期,国外学者从理论上导出平衡吸附动力学模型,以 1986 年和 1987 年的 McKee 和 Bumb 模型为代表,这类模型假设当压力下降时吸附气瞬时进入宏观孔隙中,吸附气与自由气压力处于连续平衡状态,不考虑气体在微孔系统运移过程中产生的时间延迟,忽略扩散、解吸过程(如双孔隙效应)的动力学作用。平衡吸附模型实质上是单孔隙模型,是针对煤储层具有的吸附和解吸特性在常规单孔隙模型中加入与压力有关的点源项,不能反映解吸时间的影响,事实证明该模型没有真正反映煤层甲烷的赋存运移的特征,所预测的气产量过高。

进入 20 世纪 90 年代,随着对煤层甲烷赋存运移机理的不断深入,

又提出了非平衡吸附的动力学模型,该模型认为煤层甲烷主要吸附在基质的内表面,在割理裂隙中服从达西渗流,较好地反映了煤层甲烷在煤层中的赋存运移,目前以 Comet 模型和 Coalgas 模型为代表。非平衡吸附模型,按如何处理扩散过程进一步划分为拟稳态的非平衡吸附模型和非稳态的非平衡吸附模型。拟稳态的非平衡吸附模型,使用菲克第一定律来描述气体在微孔系统中的扩散运移,扩散系数取决于基质块的几何形态和时间,而不是取决于气体体积分数。相反,在非稳态的非平衡吸附模型中使用菲克第二定律,气体体积分数是变量,考虑了气体体积分数的影响。许多拟稳态的非平衡解吸模型是以 Warren-Root 双孔隙储层模型为基础的。非稳态模型的求解很复杂,计算工作量大,因此,历史上拟合和煤层气产量预测广泛使用算法效率较高的拟稳态非平衡模型。组分模型,为了模拟产气组分随时间和提高煤层气产量注入的混相气体(氮气、二氧化碳气)的变化,包括多组分吸附、解吸动力学和代表注入气和解吸甲烷气混合的方法;黑油模型可以用来模拟煤层气开采。在这种类型的模型中,不流动的油相视作煤基质,气体从油中解吸是通过溶解气比与压力曲线实现的,该曲线用于代表等温吸附曲线。采用这种方法对孔隙度和相对渗透率数据应作一些修改,因为它没有考虑吸附气体在基质中的运移时间,这种方法本质上仍归为平衡吸附法。

国内主要以周世宁院士在 1965 年提出的瓦斯井下钻孔抽放扩散渗流理论为基础,渗流模型将瓦斯在煤层中运移视为单纯渗流,服从线性达西定律。1986 年王佑安提出的扩散模型将瓦斯在煤层中运移视为单纯扩散,服从线性菲克定律,以后他又将扩散渗流作用视为等同的扩散渗流。1990 年周世宁院士通过对扩散渗流模型的一维扩散方程与渗流方程联立求得的近似解和单纯一维渗流方程的求解结果进行比较,认为以线性达西定律为基础的煤层瓦斯运移机理是可行的,同时认为裂隙系统对煤层瓦斯流动起控制作用,扩散可忽略不计。渗流模型已成为目前国内用于指导煤层气开采的主要理论。

由此可见,国内外关于煤层甲烷运移理论方面共同存在的问题都是用线性达西渗流定律描述渗流过程,不考虑两相流体与骨架的耦合作用,缺少对吸附、解吸、扩散和渗流过程的相互制约机制研究,不能完全

反映我国低渗透储层的非线性渗流特点和吸附解吸扩散渗流相互制约的客观现实。因为煤层是由基质微孔系统和割理裂隙宏观孔隙系统组成,不同于常规天然气的特殊双重介质,煤层甲烷的运移包含从煤颗粒表面的解吸、从基质到裂隙的扩散和从裂隙到生产井的渗流过程;在实际的煤层气开采过程中,随着排采降压的不断进行,地层压力下降和孔隙流体压力的变化引起煤层气藏骨架有效应力的改变和煤体骨架的变形,即引起应力场和变形场的变化;另一方面,煤层气藏骨架的变形场和应力场的变化将导致煤层气藏孔隙度、渗透率等渗流物性参数的变化,也影响孔隙流体的渗流。煤层气在储层中的运移过程是上述应力场、变形场、渗流场间的动态流固耦合过程。目前,关于煤层气藏流固耦合的研究,多限于单相流和采用传统的达西定律的单孔隙度平衡吸附耦合模型。大量的实验和试井资料表明:在低速低渗透煤层储层中甲烷渗流出现非达西现象^[9,20,21]和滑脱效应,因此考虑低渗透煤层储层的非达西渗流效应和应力场、变形场,以及渗流场流固耦合作用的气、水二相流体在煤层双重介质中的流动问题的理论研究及吸附、解吸、扩散和渗流过程的相互制约机制研究,目前在国内仍属空白,在国外也未见报道。

煤层甲烷气体引起的煤矿安全问题,一直是人们在煤炭开采过程中着重研究的课题。因此,煤层气数值模拟的研究工作,最早是围绕预测矿井瓦斯涌出量,为矿井通风系统设计服务,以控制瓦斯灾害为目的。1964年,Lindine等根据观察到的气含量和残余气含量与深度之间存在的函数关系,提出了第一个预测生产矿井瓦斯涌出量的经验模型。1968年,Airey从理论上建立了第一个预测矿井工作面瓦斯释放量的一维单孔隙气相产量预测模型。1972年,Pricesdalla提出了二维单孔隙气、水两相产量预测模型,并开发了相应的INTERCOMP软件。经过长期的矿井瓦斯抽放实践,人们逐渐认识到煤层气既是影响煤矿生产的灾害性气体,也是一种高效洁净的能源。1970年,美国将煤层气作为一种替代能源进行开发实验,随着煤层气开发实践经验的积累,对煤层气的生气、储集和运移规律和机理有了更深入的了解,使煤层气数值模拟研究工作的重要性日益突出^[33~37]。1981年,由美国天然气研究所(GRI)主持,美国钢铁公司和宾州大学等承担经费,科研人员开始了煤层气储层模拟的

开发项目,基于双孔隙拟稳态非平衡吸附模型,建立了描述煤储层中气、水两相流动的数学模型,并开发了相应的 ARRAYS 软件。1987 年,在美国天然气研究所的支持下,人们开发出了专门用于煤层气藏模拟的双孔隙二维气-水两相流模型 COMET 软件。1989 年,美国天然气研究所与国际能源 ARI 公司等多个公司和工业财团联合,在 COMETPC 的基础上进一步开发出了 COMETPC3D 软件,与此同时,SAH (S. A. Holditch)和 Associates,有限公司独立开发了另一个可模拟煤层气和非常规气的储层模拟器 COALGAS。1998 年,ARI 公司又推出新产品 COMET2,得到推广应用的主要有 GRUSSP、COMET 系列软件和 COALGAS 软件,而在煤层气勘探开发研究和生产中应用最广泛的软件是 COMET3D。

国内煤层气储层的数值模拟方面的技术水平与美国的领先技术相比还有相当大的差距^[50~52,58]。虽然在“八五”国家科技攻关项目中专门设立了煤层气数值模拟研究课题,1994 年,原华北石油地质局与清华大学联合开发出了二维单层煤层气模拟软件 CMS,但是,对我国复杂构造条件下的低渗透、强吸附、多层赋存的煤储层来说,其实际应用受到局限。目前,我国普遍使用的煤储层数值模拟软件仍然是从美国引进的、仅为执行文件的 COMET3D 和 COALGAS 软件。由于 COMET3D 软件和 COALGAS 软件是基于美国简单地质条件反映优良储层特性开发出来的,采用的是线性达西渗流定律,它们不能较好适用于我国复杂地质条件下低渗透、强吸附储层特性。随着煤储层模拟的理论和技術不断发展,煤储层模拟软件也需要不断地升级。如果自主开发了煤储层数值模拟源程序,就可以及时地应用新的研究成果完善自己的软件,扭转煤储层数值模拟软件单纯花高价从国外引进的被动局面。因此,进一步加强我国煤层气数值模拟方面的研究工作,开发出适合于我国复杂地质条件下低渗透、强吸附储层特性煤层气储层数值模拟软件,并应用于煤层气的开发实践中,就具有重要的实际意义。

1-3 注气开采煤层气增产技术的国内外研究现状

煤层气增产技术是国内外在煤层气开发过程中急需解决的关键技

术之一,基于煤层气生成、储集和运移的机理,提高煤层气产量主要从两方面入手:一是促使煤层气产生解吸,使吸附在煤基质孔隙内表面的煤层甲烷尽可能由吸附状态转变为游离状态,扩大煤层气由基质和微孔向裂隙的扩散能力;二是扩大气体的运移通道,使煤层气通过较多的裂隙流向钻孔(井筒)。目前,煤层气的增产技术普遍沿用油气田开采中的水力压裂、割缝提高渗透率和注水驱气的方式来提高煤层气的产量,但这样往往是压裂后初始产气量有所增加,很快产气量衰减,不能形成稳定的气流。因此仅靠提高渗透率和注水驱气的方式增加低渗透煤层气的产量存在局限性,其原因是煤层瓦斯解吸、扩散和渗流过程是个互相制约的耦合过程,尤其对低渗透煤层更为突出。因为煤层气的开采主要是开采基质中占煤层气总量 70%~90% 的吸附气,而吸附气进入裂隙系统过程主要受吸附、解吸和扩散过程控制,还与煤层的孔隙结构性质和煤易碎易受污染等因素有关。此外,存在水分子直径大于储存大量瓦斯基质系统中的大部分微孔直径而难以进入基质的微孔内,对提高煤层气的解吸和扩散效率有一定的局限,水对微孔中的甲烷还起到不利的封堵作用,因此围绕煤层气吸附、解吸性能,从研究增加煤层气的解吸方法入手日益受到重视^[22,61,62]。

室内实验表明,对于给定的煤样,在等温吸附过程中,煤对 CH_4 、 CO_2 及 N_2 的吸附量有明显差别,其中煤对 CO_2 的吸附量比对 CH_4 的高,而对 CH_4 的吸附量又比对 N_2 的高。煤对不同气体的吸附性给人们一种启示,即通过对煤体注入高压 CO_2 的办法来促使煤对 CO_2 的吸附,降低煤体对甲烷的吸附,从而达到实现吸附甲烷转化为游离甲烷,促使其解吸的目的。国外正在加紧研究通过注气来提高煤层气的产量方法^[65~80],尤其对于高硫分、高灰分、低发热量而又不具备开采价值的煤层的注气开采研究有着十分重要的意义。美国能源部正在进行通过向不可采煤层注入工业生产中所产生的 CO_2 来提高 CH_4 的产量的现场测试,已达到了使 CH_4 增产的目的。煤层注入 CO_2 提高 CH_4 的产量不同于注入 CO_2 来增加石油产量,在增加石油产量中注入的 CO_2 后来是伴生产品,伴生的 CO_2 同样污染环境,而注入煤层的 CO_2 因吸附作用而使煤层成为 CO_2 的“地质储场”,减少了环境污染,同时也增加了煤层甲烷的产气量。国外在煤层气注气数值模拟方面一般不考虑解吸的影响,认

为解吸速度很快,常借助石油天然气中的“黑油”模型利用“不动油”中的溶解气模拟煤层中的吸附气来模拟注气过程,而不考虑注气、解吸、扩散、渗流过程的耦合机理和甲烷气体与骨架间非线性的耦合作用。国内学者依据传统的 CO_2/CH_4 吸附解吸实验解释增产机理,注气方面的研究主要集中在多组分混合气体的吸附解吸实验。而在考虑煤骨架变形和孔隙压力等多因素的耦合作用下建立注气、解吸、扩散、渗流过程的煤层甲烷运移耦合模型和系统地进行注气增产机理及注气规律的数值模拟研究方面尚属空白。