

煤层中的耦合运动理论及其应用

——具有吸附作用的气固 耦合运动理论

吴世跃 著



科学出版社

www.sciencep.com

煤层中的耦合运动 理论及其应用

——具有吸附作用的气固耦合运动理论

吴世跃 著

国家科技支撑计划(项目编号:2007BAK29B01)
山西省科技攻关项目(项目编号:2007031120-02)
联合资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者多年研究成果全面系统的总结。书中详细地介绍了煤层气的扩散解吸及渗流,煤层骨架变形、基质颗粒吸附变形之间相互耦合作用规律及其在工程中的应用。全书共分七章,包括绪论、耦合运动的物理数学模型、均匀孔隙介质中的扩散规律、均匀裂隙介质中的渗流规律、煤体的吸附变形与有效应力、半耦合运动规律及其应用、多组分气体运动规律及其应用。

本书可供煤炭、石油、天然气、化工、水文地质、土建等部门从事安全工程、资源开采、化工吸附分离、流固耦合力学研究的科技人员参考,也可作为高等学校相关专业本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

煤层中的耦合运动理论及其应用:具有吸附作用的气固耦合运动理论/吴世跃著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024108-5

I. 煤… II. 吴… III. 煤层-耦合 IV. P618.11 TD84

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 024071 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

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

*

2009 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 3 月第一次印刷 印张:14

印数:1—1 500

字数:270 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新蕾>)

前 言

开采煤层气资源,同时从根本上预防煤矿瓦斯灾害事故的发生,保护大气环境是人们追求的理想目标。煤层中的气体(煤层气)主要呈吸附状态,其力学性能和运动形态不同于自由气体,所以土力学中以自由流体为主体的 Terzaghi 有效应力原理不能完全解释吸附煤层气占主导作用的在煤层中发生的一些力学现象。因此,本书将主要研究孔隙介质骨架变形、基质颗粒吸附变形、吸附流体扩散解吸及自由流体渗流之间相互耦合作用规律,即对具有吸附作用的气固耦合理论进行研究,为煤层气开采、煤矿瓦斯防治及其他与气固耦合运动有关的工程应用决策提供科学依据。全书共七章,各章主要研究内容如下:

(1) 第 1 章对煤层中的耦合运动理论研究对象、研究意义、基本概念、研究现状、存在的问题、研究内容和方法进行了综合的介绍、分析、归纳和总结。

(2) 第 2、3、5 章穿插论述了煤层结构、煤层气的存在形式、煤层气的扩散和渗流运动及煤层变形运动特点及其相互关系,提出或修正了煤层气与煤共同结构模式、煤层气运动模式、煤层变形模式、吸附膨胀模式等一系列的物理概念或物理模型。基于所提出物理模型和孔隙介质截面吸附润湿长度概念、表面物理化学及弹性力学原理,导出了煤吸附膨胀应变和应力、有效应力、孔隙率、渗透率等物理量间的耦合计算公式。

(3) 第 2 章建立了固体变形、吸附煤层气扩散解吸及游离煤层气渗流的完全耦合运动的微分方程组;建立了固体介质变形,孔隙裂隙二重介质中气体的扩散渗流,均匀孔隙介质中气体的扩散,均匀裂隙介质中气体的渗流的各自非耦合运动的微分方程(组)。第 6 章结合地面钻井开采煤层气和两平行巷间煤柱中煤层气的运动的工程实例,将由 5 个方程组成的完全耦合运动的微分方程组简化到由 2 个方程组成的半耦合扩散渗流微分方程组;根据煤粒吸附煤层气扩散方程的解,进一步将由 2 个方程组成的半耦合扩散渗流微分方程组简化为 1 个方程,得到具有变形和扩散解吸作用的半耦合渗流方程,并给出了初始边界条件。第 7 章建立了多组分气体扩散渗流微分方程。论述了完全耦合、半耦合、非耦合运动的关系,耦合运动微分方程具有普遍意义,既涵盖了吸附流体和非吸附流体的耦合运动,又涵盖了吸附流体和非吸附流体的半耦合和非耦合运动,前者运动方程可由后者经过一定转化得到。

(4) 第 3 章通过试验和分析的方法求出了扩散微分方程在不同边界条件下的分析解和实验解;根据分析解提出了扩散系数和膜系数测定方法,探讨了煤与瓦斯

突出预测原理及突出预测指标;结合实例探讨了扩散解吸规律在煤与瓦斯突出预测中的应用。

(5) 第4章结合工程实例,探讨均匀裂隙煤层中非线性微分方程的求解方法,根据近似分析解,建立矿井瓦斯涌出理论数学模型和煤矿瓦斯抽放工艺参数优化设计原理。

(6) 第6章依据具有变形和扩散解吸作用的半耦合运动渗流方程,初步分析了综合评价煤层气资源的指标、易于开采的煤层气资源区域特征,影响煤层水力压裂效果的因素等;探寻了提高低渗透性煤层的渗透率及增大高吸附性能煤层气的解吸速率,从而提高煤层气采收率的途径。

(7) 第7章分析了注入增产法的增产机理,并求解出注入气开采煤层气多组分扩散渗流微分方程的近似解。注气开采煤层气除具有增能驱动和压裂作用外,还具有竞争吸附置换和过滤吸附置换的作用。

本书是作者二十多年在该领域科学研究成果集成,先后得到过山西省自然科学基金(项目编号:991028)、山西省科技攻关项目(项目编号2007031120-02)、国家科技支撑计划(项目编号:2007BAK29B01)和许多企业的资助。在二十多年科学研究过程中,长期与老师、同事、学生及现场科技工作者合作,并得到他们的支持,特别是得到我国安全工程领域的老前辈、我的老师东北大学王英敏教授、太原科技大学校长郭勇义教授、东北大学资源与土木工程学院副院长赵文教授的支持与合作,书中部分内容是合作研究成果。学生李川田、牛煜、王灿昭校对了本书部分书稿。在长期的科学研究过程中,参阅了许多作者的著作,并在思想上得到启迪,包括本书参考文献提到的和未提到的作者们。在长期的科研实践中,得到了家人极大的支持和鼓励,妻子长期辅佐文字材料的整理工作。因此,本书是集体智慧和劳动的结晶,在此一并向他们表示衷心的感谢!

鉴于具有吸附作用的气固耦合问题自身的复杂性和发展性,同时限于作者的学术水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正!

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引子	1
1.2 开采煤层气的实际意义	2
1.2.1 煤层气对矿井的危害	2
1.2.2 排放煤层气对环境的影响	3
1.2.3 煤层气的能源价值	4
1.3 开采煤层气存在的技术困境	5
1.3.1 开采煤层气面临的主要困难	5
1.3.2 煤层气与石油天然气开采理论与技术的异同	5
1.4 煤层中的耦合运动理论研究现状分析	7
1.4.1 概述	7
1.4.2 煤的化学结构与孔隙结构	7
1.4.3 煤的吸附扩散性能	9
1.4.4 煤层孔隙结构模型分类	16
1.4.5 孔隙裂隙二重介质模型	16
1.4.6 扩散理论	19
1.4.7 渗流理论	20
1.4.8 孔隙裂隙二重介质的扩散解吸与渗流理论	22
1.4.9 气固耦合力学理论	23
1.5 本书研究主要内容和方法	26
第 2 章 耦合运动的物理数学模型	28
2.1 物理过程、基本假设和运动定律	28
2.2 孔隙裂隙煤层中的基本方程	34
2.2.1 煤层变形平衡方程	34
2.2.2 煤层变形几何方程	35
2.2.3 孔隙系统中扩散运动连续方程	36

2.2.4	裂隙系统中渗流运动连续方程	37
2.3	孔隙裂隙煤层中的耦合运动微分方程组	38
2.3.1	煤层变形运动微分方程组	38
2.3.2	孔隙系统中吸附状态煤层气扩散运动微分方程	40
2.3.3	裂隙系统中游离状态煤层气渗流运动微分方程	41
2.3.4	耦合运动微分方程组的初始边界条件与求解	41
2.4	均匀孔隙煤层中的耦合运动微分方程组	41
2.5	均匀裂隙煤层中的耦合运动微分方程组	42
2.6	非煤储层中的耦合运动微分方程组	43
2.6.1	高低渗流与非煤储层变形耦合运动微分方程组	43
2.6.2	渗流与非煤储层变形耦合运动微分方程组	45
2.6.3	煤层中与非煤储层中的耦合运动的比较	46
2.7	煤层中无耦合运动微分方程	47
2.7.1	耦合运动与无耦合运动方程之间的关系	47
2.7.2	总应力作用下的变形运动微分方程组	47
2.7.3	孔隙裂隙煤层中的扩散渗流微分方程组	48
2.7.4	均匀孔隙煤层中的扩散运动微分方程	50
2.7.5	均匀裂隙煤层中的渗流运动微分方程	51
2.8	煤层中的耦合运动综合分析	52
第3章	均匀孔隙介质中的扩散规律	55
3.1	均匀孔隙煤层中的扩散微分方程分析解	55
3.1.1	一维稳定扩散	55
3.1.2	平面径向稳定扩散	57
3.2	煤粒吸附煤层气扩散解吸过程	58
3.2.1	煤粒吸附煤层气扩散的物理数学模型	58
3.2.2	扩散微分方程的边界条件分析及求解	59
3.2.3	近似解及其应用	70
3.3	扩散解吸试验研究	72
3.3.1	煤样采集与制备	72
3.3.2	试验装置	72
3.3.3	试验原理	73

3.3.4 试验步骤	74
3.3.5 试验内容	75
3.3.6 试验数据处理方法	76
3.3.7 试验数据的处理结果	78
3.3.8 扩散微分方程的试验解(内质量源的试验式)	81
3.3.9 理论和试验结果的分析讨论	82
3.4 煤与瓦斯突出预测指标	84
3.4.1 常见突出预测指标	84
3.4.2 煤与瓦斯突出机理简析	86
3.4.3 煤与瓦斯突出预测新指标探索	88
3.4.4 B_i 预测指标测试方法探讨	89
3.4.5 突出预测指标 B_i 计算实例和比较	91
3.5 煤与瓦斯突出预测应用实例	92
3.5.1 沙曲煤矿及试验区概况	93
3.5.2 突出预测方法和工艺介绍	96
3.5.3 对《测定标准》的分析	102
3.5.4 钻屑解吸指标 K 现场测定及分析	103
3.5.5 钻屑解吸指标 K 试验室测定及分析	118
3.5.6 现场与试验室试验数据分析结果的比较	128
3.5.7 几个重要结论	129
第4章 均匀裂隙介质中的渗流规律	130
4.1 均匀裂隙煤层中的渗流物理数学模型	130
4.2 平行巷间煤柱中渗流微分方程近似分析解	133
4.2.1 渗流微分方程的近似分析解	133
4.2.2 对近似分析解的讨论	137
4.2.3 近似分析解在掘进巷道瓦斯涌出量预测中的应用	138
4.3 二维渗流在移动边界条件的近似分析解	140
4.3.1 概述	140
4.3.2 工作面煤体瓦斯压力分布规律	141
4.3.3 工作面煤体瓦斯涌出量的预测	143
4.3.4 关于分析解的计算机模拟及讨论	144

4.4	一维径向渗流规律及应用	147
4.4.1	概述	147
4.4.2	一维瓦斯径向流动的数学模型	148
4.4.3	衡量煤层瓦斯抽放难易程度指标的观测	150
4.4.4	抽放钻孔有效抽放半径计算方法	153
第5章	煤体的吸附变形与有效应力	155
5.1	概述	155
5.2	吸附变形与吸附热力学参数的关系	155
5.2.1	孔隙的表面压力	155
5.2.2	吸附膨胀模式及其计算	156
5.2.3	实例模拟计算	159
5.2.4	对吸附膨胀变形特性的分析讨论	160
5.3	含吸附煤层气煤的有效应力	161
5.3.1	煤层的受力状态分析	161
5.3.2	含吸附煤层气煤层的有效应力计算公式	163
5.3.3	有效应力作用下煤体变形的理论值与实测值比较	164
5.3.4	对煤层有效应力计算公式的分析	165
5.4	孔隙率和吸附变形之间的关系	166
5.4.1	内向吸附应变与外观应变	166
5.4.2	裂隙孔隙率与煤层变形之间的关系	167
5.5	渗透率与孔隙率之间的关系	168
5.6	关于吸附变形与有效应力知识的要点	170
第6章	半耦合运动规律及其应用	172
6.1	概述	172
6.2	孔隙裂隙煤层中的半耦合运动微分方程	174
6.2.1	三维变形条件下的三维扩散渗流	174
6.2.2	一维应变条件下的二维扩散渗流	177
6.2.3	平面应变条件下的一维扩散渗流	179
6.3	均匀裂隙煤层中的半耦合运动微分方程	181
6.3.1	三维变形条件下的三维渗流	181
6.3.2	一维应变条件下的二维渗流	181

6.3.3 平面应变条件下的一维渗流	183
6.4 具有变形和扩散解吸作用的渗流方程的应用	184
6.4.1 提高煤层气采收率的途径	184
6.4.2 评价煤层气资源的主要指标	184
6.4.3 注入增产机理及影响压裂效果的因素	186
第7章 多组分气体运动规律及其应用	188
7.1 注气增产机理及效果分析	188
7.1.1 注气增产机理分析	188
7.1.2 自然降压开采煤层气的最大理论回收量和回收率	191
7.1.3 注气开采煤层气的最大理论回收量和回收率	192
7.1.4 回收率的模拟计算	194
7.2 多组分流体扩散渗流的物理数学模型	199
7.2.1 基本概念和假定	199
7.2.2 煤粒基质孔隙系统吸附气相扩散解吸方程	200
7.2.3 煤层裂隙系统中的渗流方程	201
7.3 间歇注气过程的微分方程及近似解	202
7.3.1 多组分流体扩散渗流微分方程的简化	202
7.3.2 初始边界条件	203
7.3.3 近似分析解的求解方法	204
参考文献	207

第1章 绪 论

1.1 引 子

地层是由固体骨架和孔隙裂隙构成的复杂孔隙介质,其孔隙裂隙是流体储存场所和运动的通道。地层时刻承受着垂直地应力、水平地应力、构造应力和孔隙压力,并且处于相对平衡状态。由于孔隙压力在各个方向相等,为中性应力,所以它对其他三个应力分量的影响是相同的。当采出地层中的石油天然气、煤层气、地下水、固体矿产等矿物质时,以及为了开采而进行的钻井和巷道开挖使地下物质亏空或地应力释放时,这种平衡被打破,流体与地层要运动和变形^[1~8]。根据孔隙大小及流体在孔隙中的运动形态将地层分为均匀孔隙介质、均匀裂隙介质、孔隙裂隙二重介质等^[2]。流体在多孔介质中的运动包括解吸(吸附)、扩散和渗流。流体在表面张力作用下的运动称为吸附,在浓度差作用下通过多孔介质的运动称为扩散,在压差作用下通过多孔介质的运动称为渗流。固体骨架颗粒在有效应力和温度的变化作用下,各部分之间要产生相对运动,即产生骨架(整体)变形,构成固体骨架的颗粒(基质)因吸附流体要产生(颗粒)吸附变形。流体解吸、扩散及渗流,骨架变形及颗粒吸附变形处于同一系统中,它们之间相互作用和彼此影响,这就是耦合现象和问题。因此,本书把研究地层中流体解吸、扩散及渗流,骨架变形、颗粒吸附变形之间相互耦合作用规律的科学称为储层中的耦合运动理论,本书将主要研究煤层中的耦合运动理论及其应用。这一理论依据系统中物质存在的相态,可称为自由相流体、吸附相流体及固相的三相耦合理论,依据系统中物理场可称为温度场、吸附势、浓度场、应力场及渗流场的五场耦合理论。它与习惯上人们称为流固耦合力学的区别在于除涉及渗流力学和岩石力学外,还主要涉及表面物理化学和吸附热力学,即要深入研究吸附作用对渗流和变形的深刻影响,这也是本书的主要特色和创新点之一,因此该书也可称为具有吸附作用的气固耦合理论及应用。流固耦合力学是渗流力学与固体力学交叉而生成的一门力学分支,它是研究地质环境中流体(水、气、油)与岩体相互作用的一门科学,其研究与应用涉及水力水电工程、矿产资源开发、土木工程等领域,对社会的发展具有重要的影响。

煤层是一类典型的多孔介质,一般情况下天然煤层中都储藏着大量的煤层气。煤层气是指在煤化过程中生成并残留在煤层中以甲烷为主的自生自储的天然气,在煤矿生产中又俗称矿井瓦斯。由于煤层气的主要成分是甲烷,故亦称煤层甲烷。

实际煤层气的成分还包括 CO_2 、 N_2 、 H_2O 、 C_2H_6 及高分子烃等,无特殊说明时,本书所谈煤层气或瓦斯即甲烷。煤层气既是一种洁净能源,对煤矿生产而言又是一种灾害气体。本书在介绍一般理论时多使用术语“煤层气”,而在介绍矿井灾害治理时多使用术语“瓦斯”,有时混合使用,请读者注意。另外,称呼煤层气有强调其能源价值的含义,而称呼瓦斯则重点强调其致灾的因素。

本书虽然主要以煤层气及煤层耦合运动作为研究对象,但所研究内容对其他流体与储藏地层的耦合运动也具有普遍的指导意义。

煤层气与石油、天然气、水在地层中的根本区别在于前者主要以吸附状态(占总量 90%左右)存在于地层中,而后者主要以游离状态(也是 90%左右)存在于地层中。流体在孔隙介质中的状态不同,其力学性能表现不同^[5]。因此,本书将依据吸附热力学理论,充分研究吸附煤层气在气固耦合中的作用以及在煤层气开采及煤矿瓦斯灾害防治中的应用,这也是本书与其他类似的流固耦合力学书籍的本质区别之所在。

1.2 开采煤层气的实际意义

1.2.1 煤层气对矿井的危害

在煤矿生产中放散出来的煤层气又称为矿井瓦斯,是影响和威胁煤矿正常安全生产的有害气体。它对煤矿安全作业构成的巨大威胁主要表现在瓦斯积聚超限、煤与瓦斯的突出及瓦斯爆炸等方面。瓦斯积聚超限是正常生产条件下,瓦斯通过煤层孔隙裂隙向矿井巷道缓慢地扩散渗流,引起风流中的瓦斯浓度达到或超过安全容许浓度的现象,是煤矿日常安全管理的主要内容之一。煤与瓦斯突出是在很短的时间内,从煤岩壁内部向采掘空间突然喷出煤与瓦斯的动力现象,是一种典型的气体 and 固体耦合作用的结果,是威胁煤矿职工生命与财产安全的最严重的灾害之一,其主要表现是伴有声响与剧烈的力能效应,能摧毁井巷设施,破坏矿井通风系统,使井巷充满瓦斯和煤岩抛出物,能造成人员窒息、煤流埋人,甚至还能引起瓦斯爆炸与火灾事故,导致生产中断。瓦斯爆炸是由于煤层甲烷在生产过程中超过安全浓度并达到爆炸界限,在引火源作用下而导致的另外一种极其严重的灾害。一旦发生瓦斯爆炸,不仅严重摧毁矿井设施,中断生产,同时可能引发二次灾害,使整个生产难以在短期内恢复,经济损失惨重,而且造成大量的人员伤亡和恶劣的社会影响。根据国家安全生产监督管理局网站和相关资料,2007~2008 年部分煤矿瓦斯爆炸与突出事故案例见表 1.1。从表中可以看出,与瓦斯爆炸和突出相关的事故触目惊心,因此,搞好煤矿瓦斯灾害防治具有非常重要的现实意义。

表 1.1 煤矿瓦斯爆炸突出事故例表

时 间	地 点	事故原因	伤亡人数
2008-8-18	沈阳市法库县柏家沟煤矿	瓦斯爆炸	23 人
2008-8-1	平煤集团平禹煤电公司四矿	煤与瓦斯突出	23 人死亡
2008-7-5	大同市南郊区五九煤矿		21 人死亡
2008-4-1	葫芦岛市南票区沙锅屯村第三煤矿	瓦斯爆炸	14 人死亡, 2 人下落不明
2008-3-26	湖南张家洲煤矿	瓦斯突出	10 人死亡, 3 人被困
2008-3-14	云南水洞坪煤矿	煤与瓦斯突出	14 人死亡, 2 人重伤, 2 人轻伤
2008-1-20	山西临汾市峪家岭村私开煤矿	瓦斯爆炸	25 人死亡
2008-1-18	重庆南川县高桥煤矿	煤与瓦斯突出	13 人死亡
2007-12-29	黑龙江牡丹江市穆棱市顺发煤矿	瓦斯爆炸事故	19 人死亡, 2 人受伤
2007-12-5	山西省临汾市洪洞县瑞之源煤业有限公司	特别重大瓦斯爆炸	104 人死亡
2007-11-12	河南平顶山市平煤集团公司十矿	瓦斯突出事故	12 人死亡
2007-11-8	贵州省毕节地区阳长镇群力煤矿	煤与瓦斯突出事故	35 人死亡
2007-10-25	重庆南川县南平镇跃进煤矿	瓦斯爆炸事故	10 人死亡, 1 人下落不明
2007-10-13	丰城矿务局建新煤矿	瓦斯突出事故	19 人死亡
2007-6-3	山西省忻州市泥河岭煤矿	瓦斯爆炸	13 人死亡
2007-5-24	湖南郴州市凤凰岭煤矿	瓦斯突出	13 人死亡
2007-5-23	四川泸州市泸县兴隆煤矿	瓦斯爆炸	13 人死亡, 7 人受伤
2007-5-5	山西临汾地区蒲邓煤矿	瓦斯爆炸	28 人死亡, 2 人下落不明
2007-4-30	山西阳泉市刘家村煤矿	瓦斯燃烧引发爆炸	14 人死亡
2007-4-19	河北峰峰矿业集团大淑村矿	瓦斯突出	17 人死亡
2007-3-28	山西省临汾市余家岭煤矿	瓦斯爆炸	26 人死亡
2007-3-22	河南省汝州市半坡阳商商务煤矿	透水事故	15 人死亡
2007-3-18	山西晋城市城区西上庄苗匠联办煤矿	瓦斯爆炸	21 人死亡
2007-3-6	湖南省邵阳市宏发煤矿	瓦斯爆炸	15 人死亡
2007-3-28	贵州六盘水市迤勒煤矿	瓦斯爆炸	16 人死亡

1.2.2 排放煤层气对环境的影响

在煤炭开采过程中放散出来的煤层气除危害煤矿安全生产之外,排放到大气中也会对大气环境产生严重温室效应现象,所以越来越多地受到人们的关注。为了确保煤矿安全生产,通常采用加大通风量和井下抽放等方法将甲烷从矿井抽出排入大气之中。据统计,每年我国国有重点煤矿的高瓦斯矿井通风排出的瓦斯达 33 亿 m^3 ,低瓦斯矿井通风排出的瓦斯约 11 亿 m^3 ,另外占全国煤炭总产量 50% 的地方矿通风排出的瓦斯量按 11 亿 m^3 估计,则全国总共排出瓦斯为 55 亿 m^3 ,占全世界因采煤而排入大气中甲烷量的 34%,居世界第一位。美国每天有 710 万 m^3 矿井瓦斯排放到大气中。

根据有关文献介绍,甲烷不仅是一种重要的温室效应气体,而且其浓度的提高使对流层中的臭氧增加,平流层中的臭氧减少。与 CO_2 相比,按质量计甲烷温室效应的作用比 CO_2 大 20~60 倍,甲烷还是一种寿命短的气体,它在大气中滞留时间约为 8~12 年,而 CO_2 引起的气候变暖需要几百年内才能实现^[1]。目前全球大气中 CH_4 的平均浓度已达 1.72ppm,并且每年以 0.9% 的比率增长, CH_4 对温室效应增加的贡献约为 15%。如不采取有效措施减少甲烷的排放量,21 世纪全球平均气温的增长幅度将达到每 10 年增长 0.3℃,后果不堪设想^[1]。

根据甲烷在大气中的特征和观测资料,若能减少人类活动所造成的甲烷排放总量的 10%~20%,即可使大气中甲烷浓度稳定在目前水平上。这一减少量与采煤过程中所排放甲烷在同一数量级上。更为重要的是,这一下降幅度比稳定其他温室效应气体所需要的降低值要少得多,例如 CO_2 的下降幅度必须达到 60%,故而控制减少向大气中排放的甲烷量对保护全球环境具有举足轻重的作用^[1]。

1.2.3 煤层气的能源价值

尽管煤层气具有以上两大危害,但它又是一种洁净、方便廉价的能源,是一种高热值的非常规天然气。 CH_4 发热量约为 $33.5 \times 10^6 \sim 37.3 \times 10^6 \text{J}$,按热值计算,大约 $1000 \text{m}^3 \text{CH}_4$ 相当于一吨标准煤,按热效率测算 $250 \text{m}^3 \text{CH}_4$ 即可顶替一吨标准煤,同时燃烧 CH_4 所产生的 CO_2 仅为燃烧煤的 1/2,且不产生 SO_2 和烟尘。在典型的煤层气中,甲烷一般占 95%~98%,这是符合管道运输标准的天然气。

根据中国石油天然气总公司经济研究中心的报告,我国在 2010~2020 年能源结构中,天然气占 29%,石油占 27%,煤炭占 24%,核能占 8%,其他能源占 4%^[1]。天然气消耗主要以工业燃料和化工原料为主,电力工业与民用也将成为巨大的天然气利用市场。但天然气产量与需求量之间存在巨大的差距。近年世界石油价格一路持续攀升,严重制约我国经济发展,因此开采替代能源煤层气可以缓解这种局面。

从以上分析可以看出,随着国民经济的发展,我国能源和天然气供应紧缺。目前解决能源短缺的战略有两种:开发煤层气资源和进口天然气。积极开发煤层气是一种有效可行的途径,煤层气作为一种洁净能源,既可作为民用燃料,又可成为优质的化工原料,还可用来填补天然气和石油的不足。

综上所述,如果采用技术上先进、经济上合理的方法,将煤层中的甲烷抽取出来加以利用,这样既能减少对环境的污染,又能降低煤层中的甲烷含量,从根本上消除矿井瓦斯的灾害和隐患,同时又可获得廉价的能源供应。因此开发利用煤层气能将保护环境、防治矿井瓦斯灾害、补充优质能源供应三方面有机地结合起来,取得一举三得的效果。这一方针已在美国、澳大利亚等国获得成功实施,并取得了明显的经济效益,同时形成了一个新的工业门类:煤层气工业(coalbed methane

industry)。但由于国内外煤层气开发相对于石油天然气的开发还处于初期探索阶段,理论和技术上都还不完善,所以本书的研究将有助于我国煤层气工业的进一步发展。

1.3 开采煤层气存在的技术困境

1.3.1 开采煤层气面临的主要困难

世界上许多国家蕴藏着丰富煤炭资源,同时也储存着大量的煤层气,其中俄罗斯、中国、美国等 12 个国家埋深小于 2000m 的煤层气资源达 $270 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。但各国由于煤层气储存条件不同,开发利用的程度也不同^[1]。美国从 20 世纪 70 年代末开始投入较大财力进行地面煤层气开发利用研究,目前已形成了大规模的商业性煤层气开采,取得了良好的经济效益。我国煤层气开采起始于 20 世纪 50 年代煤矿井下瓦斯防治工作,20 世纪 90 年代开始在辽宁铁法、山西晋城和柳林、两淮等地开始进行地面钻孔开采煤层气的研究工作,并且在某些矿区也取得了较好的效果。但是整体和美国比较,我国煤层气的商业性开采规模还比较小。美国煤层气主要分布在白垩纪地层组,煤层厚度大,主要富气煤田的煤质为高、低挥发分烟煤,储层压力和渗透率大,单井年产量高。我国的煤层气主要储存于石炭二叠纪煤层中,成煤年代早,煤层经历的构造运动多,内生裂隙破坏程度大,煤层厚度小,主要富气区域的煤质为高阶无烟煤,含气量、原始储层压力和渗透率相对较小,所以单产量也低,开采利用程度不高。此外,由于煤层气与天然气不同,在煤层中主要呈吸附状态,其解吸速率也严重影响着煤层气的采气速率。因此,如何提高低渗透性煤层的渗透率和解吸速率,进而提高煤层气的采收率是我国煤层气开采和矿井瓦斯防治中面临的主要困难之一。

煤层气采收率包含两方面的含义:开采煤层气时的采气速率和回收率。采气速率是单位时间内的采出的煤层气量(单产量),其随着渗流速度增大而增大。回收率是最终采出量与煤层的含气量之比。

1.3.2 煤层气与石油天然气开采理论与技术的异同

影响石油天然气采收率的主要因素有储层参数、钻采工艺、强化开采措施等。开采过程大体分为地质预评价、预选区域的勘探测试以及开采 3 个阶段,每个阶段工作都涉及孔隙介质渗流力学、岩石力学及它们之间的耦合关系。

储层参数不仅与开采过程中石油天然气流动性质有关,而且原始储层参数是选择目标区的重要依据,因此,石油天然气开发能否取得较好经济效益的关键的第一步是评价和预选择矿区,这一阶段称为地质预评价。易于开采的资源区域就是

未采取强化开采措施时自然采收率越高、商业性开采价值大、开发经济效益好的矿区;或虽采取强化措施但成本较低时,也能取得较好经济效益的矿区。储层参数主要包括原始含气量、储层压力、储层温度、渗透率、储层厚度等参数,在相同开采工艺条件下,这些参数值越大,则采收率越高。因此,如何根据孔隙介质气固耦合理论获得准确的储层参数非常重要。

石油天然气开采的第二阶段是勘探测试阶段,该阶段对预选的开采区进行试井,通过试井取得更可靠资源含量、渗透率、原始压力等地层参数,为正式开采时井网的布置设计提供依据,并预测采收率。试井所依据的理论依然是孔隙介质气固理论。若依据的理论不同,结论当然不一样。

石油天然气开采的第三个阶段就是开采阶段。该阶段在试井的基础上,进一步优化钻采工艺和选择合理的强化开采措施。钻采工艺包括钻井方式、钻井工艺、完井技术、井间距、井底抽放负压等,合理的钻采工艺可提高资源的采收率。强化开采措施(enhanced oil recovery)^[3,4]就是通过提高储层能量(增加储层与井底压差)、增加储层渗透性、改变流体与储层间亲和力、置换作用等来提高石油天然气的采收率。在石油天然气的开采过程中,依靠地层天然的能量,只能开采石油天然气地质储量的30%左右,若采取注水、注聚合物、注碱水、回注天然气、注烟道气、注泡沫、水力压裂等措施可将石油天然气回收率提高到60%~90%,单产量也大幅提高^[4]。钻采工艺和强化开采措施的选择离不开气固耦合理论的指导。

影响煤层气开采的主要因素和开采过程与石油天然气基本相同,因此可以借鉴石油天然气开采中的许多理论观点与方法^[2]来指导煤层气开采,但煤层气有自身的某些特点,所以又不能完全照搬。其主要原因有以下几点:

(1) 存在状态不同。尽管煤层气与石油天然气均为流体,但在地层中存在的主要状态不同:煤层气总量的90%左右在地层中呈吸附状态,石油天然气总量90%左右在地层中主要呈游离状态(自由流体)。

(2) 运动形式不同。流体在孔隙介质中的状态不同,其力学表现和运动机理不同^[5]。仅承受重力作用的自由流体能传导压力,其运动服从达西定律;而受表面张力作用的吸附状态流体则不能传导压力,其运动主要是分子热运动的结果,即分子热扩散运动。大多数研究忽略了占多数地位吸附状态煤层气的作用。

(3) 增产措施的实践效果不完全相同。水力压裂在石油天然气开采中已取得较好的效果,但在中国煤层气开采实践中,整体效果并不理想^[4],仅依据达西渗流定律不能完全解释这一现象。因此必须深入研究煤层气流动及煤层变形的相互作用机理。

(4) 通过注入液体或气体,或增加储层能量,或维持储层能量,或改变石油天然气的物理力学性能都可以提高原油和天然气的采收率。但由于煤层气开采是排水降压气体解吸的开采过程,所以注水反而会抑制煤层气的解吸与堵塞气体流动

的通道不利于煤层气的开采。注气增加并维持了煤层的能量,肯定能对煤层气流动产生驱动并维持流动的效果,但吸附置换对提高煤层气回收率又有何影响?

总之,与石油天然气相比,煤层气的储存方式以吸附为主,运动形式不完全相同,煤层能量低,渗透性差,开采难度更大,仅仅依靠石油天然气开采理论和技术很难提高煤层气单产量和回收率,因此必须深入研究具有吸附作用的气固耦合理论,指导煤层气开采工作。

1.4 煤层中的耦合运动理论研究现状分析

1.4.1 概述

自1856年法国工程师达西(Darcy)提出孔隙介质线性渗流定律以来,人们对达西定律进行了各种修正,如非线性渗流的幂定律、二项式渗流定律、克林贝尔效应等,由此推动着渗流力学向更符合实际的方向发展。1923年太沙基(Terzaghi)提出了有效应力计算公式^[8],揭开了渗流力学和固体力学相互关系研究的新篇章,并形成一门新的学科——流固耦合力学,目前对其研究仍然方兴未艾。而对流体在孔隙介质扩散,特别是吸附状态流体对渗流和固体变形影响的研究,则是蹒跚学步,裹足不前。

煤层孔隙结构特征决定孔隙流体的存在形式和运动形态,而孔隙流体运动理论又分以下几个主要研究流派:扩散理论、渗流理论、扩散渗流理论、流固耦合理论等。各种流派或理论目前在生产实际中都有应用,但都不同程度地存在缺陷。因此,下文在分析煤层孔隙结构特征的基础上,分析孔隙流体运动理论在煤矿瓦斯灾害防治、煤层气开采以及在其他相关行业中的应用研究成果,综述煤层气与煤层耦合运动理论的研究现状,存在的问题及发展趋势。

1.4.2 煤的化学结构与孔隙结构

1.4.2.1 煤的化学结构

煤的结构包括两个方面的内容:一是煤的化学结构即煤的分子结构,二是煤的物理结构即孔隙结构。其中煤的化学结构主要与煤的化学处理及吸附性能有关,而煤的物理结构主要与煤的吸附和孔隙流体流动状态有关。

人们根据不同研究目的和结构测试方法,提出了许多结构模型。煤的化学结构模型类型有煤大分子结构模型、煤分子间构造模型、煤结构的综合模型、固溶体结构模型,前三类模型每类模型又有分许多不同的结构模型^[9]。分子间构造模型中的两相模型或主-客(host-guest)模型是由 Given 等根据 NMR 氢谱发现煤中质子的弛豫时间有快慢两类而提出的,其中大分子网络为固定相,小分子则为流