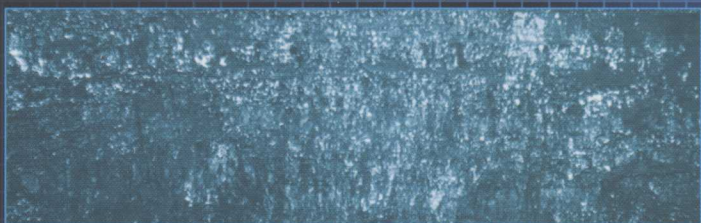
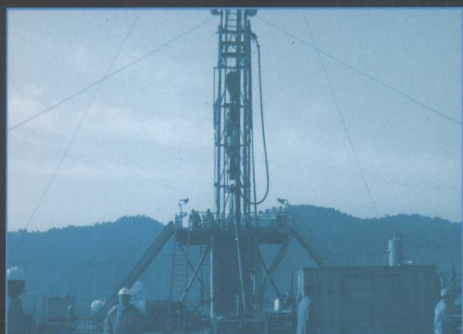


煤层气开发地质学 理论与方法

THEORY AND METHOD OF COALBED METHANE
DEVELOPMENT GEOLOGY

孟召平 田永东 李国富 著



科学出版社
www.sciencep.com

P618.11
4

湖北省“楚天学者计划”特聘教授岗位

国家自然科学基金项目(编号:40772100)

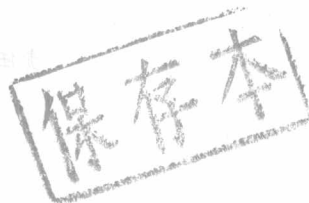
国家自然科学基金重点项目(编号:41030422)

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(编号:2007CB209405)

煤层气开发地质学理论与方法

Theory and Method of Coalbed
Methane Development Geology

孟召平 田永东 李国富 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对我国煤层气开发地质条件的特点,从煤的物质组成及其基本物理化学性质分析入手,把煤储层条件与煤层气赋存环境条件和煤层气开发工程力学条件结合起来开展研究。系统介绍了煤的物质组成及其基本物理化学性质、煤储层厚度及其预测技术、煤储层孔隙-裂隙特征及其孔渗性、煤储层含气性及其控制理论、煤的吸附与解吸特性及其受控机制,以及煤储层条件评价与预测的理论和方法;系统地分析了现今地应力条件和水文地质条件及其对煤层气开发的影响,建立了水文地质条件与煤层气开发的关系,以及现今地应力场特征及其与煤储层渗透性的关系和模型,提出了一系列独到的见解。进一步研究了煤储层变形力学特性,煤层气开发过程中的压裂机理、解吸机理和煤储层三相体系中的流体渗流机理,以及煤层气开发技术等问题,为煤层气高效开发提供了可靠的理论和方法。本书资料数据翔实、内容丰富,具有很强的科学性、创新性、资料性和实用性。

本书可供从事煤层气地质及勘探开发的科技人员,煤炭、石油、地质工作者,以及地质、采矿和油气开发等专业的高校师生参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气开发地质学理论与方法/孟召平,田永东,李国富著. —北京:科学出版社,2010.10

ISBN 978-7-03-029114-1

I. ①煤… II. ①孟…②田…③李… III. ①煤层—地下气化煤气—采矿地质学 IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 189601 号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:包志虹

责任印制:张克忠 / 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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年10月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—3 000 字数:470 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

煤层气是主要以吸附状态赋存于煤层之中的一种自生自储式非常规天然气。它是一种新型的洁净能源和优质化工原料,是我国在 21 世纪的重要接替能源之一。煤层气开发地质学是研究煤层气开发工程活动与煤层气赋存地质条件之间相互作用和相互影响的一门学科;也就是研究与煤层气开发工程活动有关的地质条件及其评价、预测及有效开发的科学。我国煤层气资源非常丰富,埋深 2000m 以浅的资源量为 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占世界煤层气总资源量的 13%,与常规天然气资源量相当,是继俄罗斯和加拿大之后的第三大煤层气资源国。因此开发利用煤层气,对缓解我国常规油气供应紧张状况、改善煤矿安全生产条件、实施国民经济可持续发展战略、保护大气环境等多方面均具有十分重要的意义。

长期以来,在煤炭地下开采过程中煤层气被视为有害气体——瓦斯,大多进行井下抽放,利用很少,并未从资源的角度加以认识。直到 20 世纪 80 年代美国解决了从地面开发煤层气的技术以后,煤层气作为一种非常规天然气资源,日益受到世人关注。我国自 20 世纪 80 年代以来,将煤层气作为一种资源进行勘探评价研究,同时积极引进美国现代煤层气开采技术,进行煤层气勘探开发试验,并对我国煤层气开发的基本地质条件有了系统认识,基本掌握了可供开发的煤层气资源和基本技术。截至 2009 年底,在我国施工的各类煤层气井已达 4000 余口,多个井组已取得较好的产气效果,并实现了小规模商业化生产。特别是在沁水盆地南部高变质无烟煤层中获得了较为理想的单井工业气流,实现了单井产气突破,创建了一定规模的生产试验井组的煤层气开发示范工程。2009 年底沁水盆地南部地区已完成煤层气地面预抽井达 3000 口,单井最高日产气量超过 10000 m^3 ,有一大批井日产气量超过 3000 m^3 。目前沁水盆地南部已成为我国具有商业性开发价值的煤层气生产基地,它打破了世界上在高煤阶地区开展煤层气勘探开发的禁区,进一步拓宽了煤层气勘探开发的层系和领域。据 2009 年统计,全国煤层气总抽采量 $71.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中井下抽采量 $61.70 \times 10^8 \text{ m}^3$,地面抽采量 $10.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。晋城煤业集团的地面煤层气产量为 $6.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国地面总产量的 61.08%;井下煤层气产量为 $5.48 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国井下总产量的 8.88%,合计总量为 $11.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国总产量的 16.27%。晋城煤业集团走出了一条“井上、井下抽采并举,抽采与利用并举”的煤矿瓦斯治理新思路。

由于我国盆地煤层气赋存地质条件复杂,盆地原型及构造样式多变,尤其是我国煤层气成藏地质条件与美国有很大差别,具有成煤时间早、演化程度高、构造变动强烈等特点,使得煤层气开发地质条件更为复杂,煤储层大多表现为低压、低渗、低饱状况,以及具有强烈的不均一性特征,煤层气井普遍产量低、不稳定,且衰减快。加之,适合我国煤层气开发的配套技术还不完善,迄今尚未形成规模性的开发与利用,无论其理论或方法都还有待不断完善和创新。因此研究煤层气开发地质条件和开发技术,发展我国煤层气开发地质理论与方法,对于合理有效开发我国煤层气资源具有理论和实际应用意义。

煤层气开发地质研究是煤层气开发的基础工作,贯穿于煤层气勘探开发的全过程。《煤层气开发地质学理论与方法》一书正是针对目前我国煤层气开发地质条件的特点,从煤的物质组成及其基本物理化学性质分析入手,把煤储层条件与煤层气赋存环境条件和煤层气开发工程

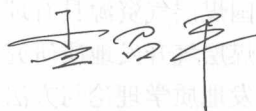
力学条件结合起来开展研究。本书系统介绍了煤的物质组成及其基本物理化学性质、煤储层条件及其受控机制;研究了煤层气赋存环境条件及其对煤储层孔渗性和开发的影响;进一步研究了煤储层变形力学特性,煤层气开发过程中的压裂机理、解吸机理,煤储层三相体系中的流体渗流机理,以及煤层气开发技术等问题,为煤层气高效开发提供了可靠的理论依据。本书共10章,由孟召平教授、田永东博士和李国富博士合作完成,其中前言、第1~5章和第8、9章由孟召平教授撰写;第6章由田永东博士撰写;第10章由李国富博士撰写;第7章由孟召平教授和田永东博士撰写;全书由孟召平教授统稿。

本书是作者负责承担的国家自然科学基金项目:《煤层构造有限变形及其对煤储层渗透性的控制》(编号:40772100)、国家自然科学基金重点项目《复杂盆-山构造演化过程中煤层气赋存特征与富集机理研究》(编号:41030422)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划):《矿井突水的危险性评价理论与方法》(编号:2007CB209405)、博士学科点专项科研基金《深部煤炭开发中冲击地压与地质因素之间的耦合关系与受控机制研究》(编号:20050290009),以及前期多项部门科研课题研究成果的整理和总结。需要指出的是,本书是我们研究集体的共同成果。参加这方面研究的成员还有朱绍军博士、易武博士、张吉昌博士、潘结南博士、于倩倩、刘亮亮、张宁、孟贵希和雷旻硕士等,以及博士研究生王睿、郭彦省,硕士研究生贺小黑、刘建、兰华、谢晓彤、贾立龙、申正伟、张贝贝、申恒明等。很多同学为本书的插图进行了计算机清绘和部分资料的收集整理,在此特表谢意!

本书的研究工作自始至终得到了中国矿业大学张鹏飞教授、任德贻教授、彭苏萍院士、孙继平教授、王延斌教授、曹代勇教授、唐跃刚教授、武强教授、秦勇教授、傅雪海教授、赵峰华教授、代世峰教授、胡社荣教授、李贤庆教授、邵龙义教授、刘钦甫教授和刘升贵博士;三峡大学李建林教授、田斌教授、张国栋教授、彭慧明教授、王尚庆教授、郑宏教授、卢应发教授、易庆林老师和程圣国老师;中国石油大学(北京)程林松教授和张遂安教授;中国地质大学汤达祯教授、王生维教授、刘大锰教授和唐书恒教授;河南理工大学曹运兴教授和苏现波教授;西安科技大学侯恩科教授和马东民教授;中石化华东分公司周松副总经理和吴群处长、朱杰平处长;晋城煤业集团煤层气产业发展局王保玉局长;中石油新能源处雷怀玉处长;国土资源部储量司张延庆研究员等的帮助和支持。还得到煤炭科学研究总院西安研究院、中国石油山西煤层气勘探开发分公司、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、中石化华东分公司、中联煤层气有限责任公司和沁水蓝焰煤层气有限责任公司的领导及工程技术人员的关心和帮助,在此表示衷心地感谢。同时,还要感谢书中引用文献作者的支持和帮助。

本书的出版得到了湖北省“楚天学者计划”三峡大学地质工程专业特聘教授岗位的资助;同时,也得到了国家自然科学基金项目(编号:40772100)、国家自然科学基金重点项目(编号:41030422)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(编号:2007CB209405)、博士学科点专项科研基金(编号:20050290009),以及多项部门科研课题的资助,在此表示衷心地感谢。

煤层气开发地质学研究涉及多学科理论与方法,有许多理论和实践问题仍有待于深入探讨与揭示,书中如有不妥之处,敬请读者批评指正。



2010年5月于北京

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 煤层气开发地质学研究目的与意义	1
1.2 煤层气勘探及开发研究现状	2
1.2.1 国外研究现状	2
1.2.2 国内研究现状	4
1.3 本书研究的内容与方法	7
参考文献	9
第 2 章 煤的物质组成及其基本物理化学性质	12
2.1 引言	12
2.2 煤的物质组成	12
2.2.1 煤储层固态物质组成	12
2.2.2 煤中的水 and 气	16
2.3 煤化作用及煤层气的形成	17
2.3.1 煤化作用	17
2.3.2 煤化作用特点及煤化程度指标	17
2.3.3 煤层气的形成	19
2.4 煤的基本物理化学性质	21
2.4.1 煤的基本物理性质	21
2.4.2 煤的基本化学性质	25
2.5 基于测井曲线的煤质参数预测	27
2.5.1 研究区煤层煤质特征	28
2.5.2 煤的工业分析与测井参数之间关系	29
2.5.3 煤质参数预测的多元回归模型	33
2.5.4 煤质参数预测的 BP 神经网络模型	35
2.5.5 两种模型的对比分析	37
参考文献	39
第 3 章 煤储层厚度及其预测技术	41
3.1 引言	41
3.2 煤层的形成与煤厚变化的控制因素	41
3.2.1 煤层的形成	41
3.2.2 煤厚变化的控制因素	43
3.3 煤储层厚度稳定性评价	48

3.3.1	煤储层厚度稳定性评价步骤和方法	49
3.3.2	煤储层厚度及其稳定性分析	50
3.4	基于地震属性的煤储层厚度预测技术	53
3.4.1	背景技术	53
3.4.2	关于厚度预测方法	54
3.4.3	煤储层厚度预测的基本原理	56
3.4.4	淮南谢桥煤矿 13-1 煤储层厚度预测分析	60
3.5	煤储层厚度对煤层气井产能的影响	63
3.5.1	煤层分布特征对煤层气井产能的影响	63
3.5.2	煤储层厚度对煤层气井产能的控制分析	64
3.5.3	沁水盆地南部煤储层厚度与煤层气井产气量对比分析	65
	参考文献	67
第 4 章	煤储层孔隙-裂隙特征及其孔渗性	69
4.1	引言	69
4.2	煤的孔隙特征	69
4.2.1	煤孔隙结构	69
4.2.2	煤的孔隙成因	70
4.2.3	煤的孔隙表征参数	71
4.2.4	煤的孔隙结构测定方法	73
4.3	煤储层裂隙系统	78
4.3.1	煤中节理(裂隙)类型	78
4.3.2	煤中节理(裂隙)的分级及特征	79
4.3.3	煤中节理(裂隙)的表征参数	82
4.4	煤储层渗透性及其评价	90
4.4.1	煤储层渗透性	90
4.4.2	煤储层渗透性评价分类	95
4.5	煤储层渗透性影响因素	99
4.5.1	地质构造	99
4.5.2	煤体结构	102
4.5.3	煤层埋藏深度	104
4.5.4	现今地应力	105
4.6	基于最大主曲率的煤储层渗透性预测及应用	106
4.6.1	渗透性预测的基本原理	106
4.6.2	煤储层渗透率预测的应用	109
	参考文献	111
第 5 章	煤储层含气性及其控制理论	113
5.1	引言	113
5.2	煤层气的赋存状态及气体组分特征	113
5.2.1	煤层气的赋存状态	113

5.2.2 煤层气的气体组分特征	115
5.3 煤层含气量测试方法	116
5.3.1 煤层含气量的解吸法	117
5.3.2 逸散/损失气量的估算	118
5.4 煤储层压力	118
5.4.1 煤储层压力基本概念	118
5.4.2 煤储层压力的影响因素	120
5.5 煤储层含气饱和度	123
5.5.1 含气饱和度的基本概念	123
5.5.2 含气饱和度的影响因素	124
5.5.3 临界解吸压力	125
5.6 影响煤层气富集的地质因素及其控气理论	125
5.6.1 地质构造及其控气作用	125
5.6.2 煤变质作用对煤层含气性的影响	129
5.6.3 有效埋藏深度及其控气作用	130
5.6.4 上覆地层厚度及其控气作用	133
5.6.5 煤层顶底板岩性及其控气作用	135
5.6.6 煤岩、煤质特征的影响	138
5.6.7 水文地质条件的控气作用	138
5.7 煤层含气量的预测方法	139
5.7.1 基于 Langmuir 方程的煤层含气量预测方法	139
5.7.2 煤层含气量 BP 网络预测方法	143
5.8 煤层含气量对煤层气井产能的控制	147
参考文献	149
第 6 章 煤的吸附与解吸特征	150
6.1 引言	150
6.2 吸附与解吸理论	150
6.2.1 气固吸附及吸附热力学	150
6.2.2 吸附等温式	154
6.2.3 吸附滞后现象	156
6.2.4 吸附/解吸等温试验	158
6.3 煤的吸附与解吸特征	159
6.3.1 煤的吸附特征	159
6.3.2 煤的解吸特征	165
6.3.3 吸附质	166
6.3.4 吸附时间	167
6.4 煤的吸附与解吸差异性实验研究	169
6.4.1 等温吸附与解吸实验	169
6.4.2 煤样的“解吸滞后”特征	177

6.5 煤的吸附解吸特性对煤层气开发的影响	178
6.5.1 对煤层气井临界解吸压力的影响	178
6.5.2 对煤层气井产量的影响	180
6.5.3 对煤层气井采收率的影响	181
参考文献	183
第7章 水文地质条件及其对煤层气开发的影响	184
7.1 引言	184
7.2 水文地质条件	184
7.2.1 地下水类型及特征	184
7.2.2 主要含水层和隔水层类型	187
7.3 水文地质条件的控气作用	189
7.3.1 煤层气随地下水运移逸散作用	189
7.3.2 水力封闭控气作用	192
7.4 煤层气井开发的排水降压过程	193
7.4.1 煤层气单井的排采规律	193
7.4.2 煤层气单井的排采阶段及特征	195
7.4.3 煤层气单井排采的局限性	196
7.4.4 煤层气井井间干扰	197
7.5 水文地质条件对煤层气井产能的影响	198
7.5.1 主要含水层条件对煤层气开发的影响	198
7.5.2 煤层自身水文地质条件对煤层气井产能的影响	200
7.5.3 煤层顶底板的水文地质条件对煤层气井产能的影响	202
7.5.4 考虑地下水影响的煤层气井产量预测	203
7.6 煤层气开发的水文地质条件评价分类	205
7.6.1 矿井水文地质类型	205
7.6.2 煤层气开发的水文地质条件评价分类	206
参考文献	208
第8章 现今地应力及其对煤储层渗透性的控制	209
8.1 引言	209
8.2 地应力成因类型及应力状态	209
8.2.1 地应力成因类型	209
8.2.2 岩体天然应力状态及其类型	211
8.2.3 有效应力	213
8.2.4 煤储层的压缩系数	216
8.3 沁水盆地南部现代地应力场特征	218
8.3.1 地应力随深度的变化	218
8.3.2 最小水平主应力、垂直主应力和孔隙压力之间的关系	220
8.3.3 垂直应力与水平应力之间的关系	222
8.3.4 现今地应力方向	223

8.4	煤储层渗透性与现今地应力之间的关系	225
8.5	地应力对煤储层渗透性影响机理分析	229
8.5.1	裂隙岩体渗透特性与应力耦合关系	229
8.5.2	煤储层中的应力和变形对渗透性的影响	233
	参考文献	235
第9章	煤、岩石力学性质及其压裂机理研究	236
9.1	引言	236
9.2	煤、岩石力学性质	236
9.2.1	煤、岩石变形及强度参数	236
9.2.2	煤的变形力学特性	240
9.2.3	煤、岩石破坏的基本形式和机制	244
9.3	煤、岩破坏准则	246
9.3.1	莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则	246
9.3.2	格里菲斯准则	248
9.4	煤层气井压裂的基本原理及应用分析	249
9.4.1	水力压裂的基本原理	249
9.4.2	沁水盆地南部水力压裂试验结果及分析	252
9.5	煤岩压裂的裂缝形态及其影响因素	253
9.5.1	煤岩压裂的裂缝形态	253
9.5.2	地应力对压裂裂缝扩展的影响	254
9.5.3	岩性对水力压裂裂缝扩展的影响	257
9.5.4	原生裂隙对水力压裂裂缝扩展的影响	259
	参考文献	260
第10章	煤层气产出规律及其开发技术	262
10.1	引言	262
10.2	煤层气产出规律	263
10.2.1	煤层气井产出的动态规律	263
10.2.2	煤层气井排采特征	265
10.2.3	矿井瓦斯自然排放衰减规律	270
10.3	煤层气开发方式	271
10.3.1	概况	271
10.3.2	煤矿井下抽采	272
10.3.3	地面钻井开发	278
10.4	煤层气地面垂直井开采及采收率预测	287
10.4.1	煤层气勘探开发选区评价	287
10.4.2	煤层气地面开发的井网优化	290
10.4.3	单井开发及井组开发产能比较	291
10.4.4	采收率预测	295
	参考文献	298

CONTENTS

PREFACE

CHAPTER 1 EXORDIUM	1
1.1 Purpose and significance of CBM development geology	1
1.2 Research status of the exploration and development of CBM	2
1.2.1 Research status abroad	2
1.2.2 Research status inland	4
1.3 Subject and research method of CBM Development geology	7
Reference	9

CHAPTER 2 MATERIAL COMPOSITION AND THE BASIC PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF COAL

2.1 Introduction	12
2.2 Material composition of coal	12
2.2.1 Solid material composition of coal	12
2.2.2 Existence of water and gas in coal	16
2.3 Coalification and the formation of CBM	17
2.3.1 Coalification	17
2.3.2 Characteristics of the coalification and the index of the coalification degree	17
2.3.3 Formation of CBM	19
2.4 Basic physico-chemical properties of coal	21
2.4.1 Basic physical properties of coal	21
2.4.2 Basic chemical properties of coal	25
2.5 Prediction of the coal quality parameters based on logging curves	27
2.5.1 Characteristics of coal seam and coal quality in the research area	28
2.5.2 Relationships of coal's industrial analysis and logging parameters	29
2.5.3 Multiple regression prediction model of coal quality parameters	33
2.5.4 BP neural network prediction model of coal quality parameters	35
2.5.5 Comparative analysis of the two models	37
Reference	39

CHAPTER 3 Thickness of coal reservoir and its prediction technique

3.1 Introduction	41
3.2 Formation of coal seam and the controlling factors of its thickness	41
3.2.1 Formation of coal seam	41
3.2.2 Controlling factors of coal seam thickness	43
3.3 Evaluation stability of coal seam thickness	48

3.3.1	Evaluation steps and methods of the coal seam thickness stability	49
3.3.2	Analysis of coal seam thickness and its stability	50
3.4	Prediction technique of coal seam thickness based on seismic attribute	53
3.4.1	Technological background	53
3.4.2	Prediction method of coal seam thickness	54
3.4.3	Basic principle of the prediction of coal seam thickness	56
3.4.4	Prediction analysis of the No. 13-1 coal seam thickness in Xie-Qiao coalmine, Huai-nan	60
3.5	Effects of coal seam thickness to the productivity of the CBM well	63
3.5.1	Difference of CBM well's productivity caused by the distributive characteristics of coal seam	63
3.5.2	Analysis of CBM well's productivity controlled by the coal seam thickness	64
3.5.3	Comparative analysis of the coal seam thickness and the CBM well's productivity in Southern QinShui basin	65
Reference		67
CHAPTER 4 PORE-FRACTURE CHARACTERISTICS OF COAL RESERVOIR AND ITS PORE RATIO AND PERMEABILITY		
4.1	Introduction	69
4.2	Pore characteristics of coal	69
4.2.1	Pore structure of coal	69
4.2.2	Pore origin of coal	70
4.2.3	Characterization parameters of coal pore	71
4.2.4	Determination method of the pore structure of coal	73
4.3	Fracture system of coal reservoir	78
4.3.1	Types of joint(fracture) in coal	78
4.3.2	Classification and characteristic of the joint(fracture) in coal	79
4.3.3	Characterization parameters of the joint (fracture) in coal	82
4.4	Permeability of coal reservoir and its evaluation	90
4.4.1	Permeability of coal reservoir	90
4.4.2	Evaluation classification of coal reservoir's permeability	95
4.5	Influence factors of coal reservoir's permeability	99
4.5.1	Geological structure	99
4.5.2	Coalbody structure	102
4.5.3	Buried depth of coal seam	104
4.5.4	Present ground stress	105
4.6	Predication and application of coal reservoir's permeability based on the maximal principal curvatures	106
4.6.1	Basic principle of permeability's predication	106
4.6.2	Application of coal reservoir permeability's predication	109
Reference		111

CHAPTER 5 GAS CONTENT OF COAL RESERVOIR AND ITS CONTROL THEORY	113
5.1 Introduction	113
5.2 Occurrence of CBM and its component characteristic	113
5.2.1 Occurrence of CBM	113
5.2.2 Component characteristic of CBM	115
5.3 Test methods of coal-bed gas content	116
5.3.1 Desorption method of coal-bed gas content	117
5.3.2 Estimation of lost gas	118
5.4 Coal reservoir pressure	118
5.4.1 Basic concept of coal reservoir pressure	118
5.4.2 Influence factors to coal reservoir pressure	120
5.5 Gas saturation of coal reservoir	123
5.5.1 Concept of the gas saturation	123
5.5.2 Influence factors to gas saturation	124
5.5.3 Critical desorption pressure	125
5.6 Geological factors to the enrichment of CBM and its theory controlled gas	125
5.6.1 Geological structure and its function controlled gas	125
5.6.2 Effect of coal metamorphism to the coal seam's gas content	129
5.6.3 Effective buried depth and its function controlled gas	130
5.6.4 Thickness of overlying strata and its function controlled gas	133
5.6.5 Lithologic of coal roof and floor and its function controlled gas	135
5.6.6 Effect of coal petrographic and coal quality characteristics	138
5.6.7 Function controlled gas by hydrogeological condition	138
5.7 Prediction method of coal seam's gas content	139
5.7.1 Prediction method of coal seam's gas content based on the Langmuir equation	139
5.7.2 BP networks method of coal seam's gas content	143
5.8 Influence of coal seam's gas content on the productivity of CBM well	147
Reference	149
CHAPTER 6 ADSORPTION AND DESORPTION CHARAVTERISTICS OF COAL	150
6.1 Introduction	150
6.2 Adsorption/desorption theory	150
6.2.1 Gas-solid adsorption and the adsorption thermodynamics	150
6.2.2 Adsorption isotherm formula	154
6.2.3 Adsorption hysteresis	156
6.2.4 Calculation of adsorption and desorption quantity	158
6.3 Adsorption and desorption characteristics of coal	159
6.3.1 Adsorption characteristics of coal	159
6.3.2 Desorption characteristics of coal	165
6.3.3 Adsorptive	166

6.3.4	Adsorption time	167
6.4	Experimental study of the adsorption and desorption difference of coal	169
6.4.1	Adsorption isothermal experiment and the desorption isothermal experiment	169
6.4.2	The “desorption hysteresis” of the coal sample	177
6.5	Effect of the coal’s adsorption and desorption to the development of CBM	178
6.5.1	Effect to the critical desorption pressure of CBM well	178
6.5.2	Effect to the yield of CBM well	180
6.5.3	Effect to the recovery of CBM well	181
	Reference	183
CHAPTER 7 HYDROGEOLOGICAL CONDITION AND ITS EFFECT TO THE DEVELOPMENT OF CBM		
7.1	Introduction	184
7.2	Hydrogeological condition	184
7.2.1	Types and characteristics of groundwater	184
7.2.2	Types of major aquifer and aquifuge	187
7.3	Function controlled gas by the hydrogeological condition	189
7.3.1	Dissipation of CBM with the migration of groundwater	189
7.3.2	Function controlled gas by the hydraulic sealing	192
7.4	Drainage and decompression development of CBM well	193
7.4.1	Draining law of CBM single-well	193
7.4.2	Draining phases of CBM single-well and their characteristics	195
7.4.3	Draining limitation of CBM single-well	196
7.4.4	Interference between CBM wells	197
7.5	Effect of hydrogeological condition to the productivity of CBM well	198
7.5.1	Effect of major aquifer conditions to the development of CBM	198
7.5.2	Coal seam itself hydrogeological condition to the productivity of CBM well	200
7.5.3	Effect of surrounding rock’s hydrogeological condition to the productivity of CBM	202
7.5.4	Production prediction of CBM well under the effect of groundwater	203
7.6	Evaluation of hydrogeological condition of CBM	205
7.6.1	Hydrogeological types of coal mine	205
7.6.2	Classification and evaluation of CBM hydrogeological condition	206
	Reference	208
CHAPTER 8 PRESENT GROUND STRESS AND ITS INFLUENCE ON THE PERMEABILITY OF COAL RESERVOIR		
8.1	Introduction	209
8.2	Genetic types of ground stress and its stress state	209
8.2.1	Genetic types of ground stress	209
8.2.2	Natural stress state of rock mass and its types	211
8.2.3	Effective stress	213

8.2.4	Compression coefficient of coal reservoir	216
8.3	Characteristics of present ground stress field in Southern QinShui Basin	218
8.3.1	Change of ground stress with the change of depth	218
8.3.2	Minimum horizontal stress, vertical stress, and pore pressure relationship	220
8.3.3	Minimum horizontal stress and burial depth	222
8.3.4	Direction of present ground stress	223
8.4	Relationship between permeability of coal reservoir and present ground stress	225
8.5	Influencing mechanism of stress on the permeability of coal reservoir	229
8.5.1	Coupling-relationship of the permeability of fractured rock mass and the stress	229
8.5.2	Effect of the stress and deformation in coal reservoir to the permeability	233
	Reference	235
CHAPTER 9 MECHANICAL PROPERTIES OF COAL AND ROCK AND THE STUDY ON THEIR CRACKING MECHANISM		
9.1	Introduction	236
9.2	Mechanical properties of coal and rock	236
9.2.1	Deformation and strength parameters of coal and rock	236
9.2.2	Mechanical characteristics of coal deformation	240
9.2.3	Basic forms and mechanism of coal and rock's failure	244
9.3	Failure criterion of coal and rock	246
9.3.1	The Mohr-Coulomb criterion	246
9.3.2	The griffith criterion	248
9.4	Hydrofracturing principle of CBM well and the analysis of its application	249
9.4.1	Basic principle of hydrofracturing	249
9.4.2	Results of hydrofracturing test in south QinShui Basin and its analysis	252
9.5	Crack morphology of hydrofracturing and its influencing factors	253
9.5.1	Crack morphology of hydrofracturing in coal	253
9.5.2	Influence of ground stress on hydrofracturing crack extension	254
9.5.3	Influence of lithology on hydrofracturing crack extension	257
9.5.4	Influence of preexisting fissures on hydrofracturing crack extension	259
	Reference	260
CHAPTER 10 PRODUCTION LAW AND DEVELOPMENT TECHNOLOGY OF CBM		
10.1	Introduction	262
10.2	Production law of CBM	263
10.2.1	Dynamic law of CBM's development	263
10.2.2	Characteristic of the production of CBM well	265
10.2.3	Spontaneous attenuation law of coal mine gas	270
10.3	Development modes of CBM	271
10.3.1	General situation	271
10.3.2	Extraction in underground coal mine	272

10.3.3	Development of drilling on the ground	278
10.4	CBM Development of vertical well on the ground and the prediction of the recovery	287
10.4.1	Evaluation of area selection in the exploration and development of CBM	287
10.4.2	Well pattern optimization of the ground development of CBM	290
10.4.3	Productivity compare of the single-well and well group	291
10.4.4	Prediction of the recovery	295
Reference		298

第 1 章 绪 论

1.1 煤层气开发地质学研究目的与意义

我国是一个煤炭资源大国(资源量约为 $5 \times 10^{12} \text{ t}$),自 1988 年以来,我国煤炭的产量和消费量在世界上一直居首位。2009 年全国累计原煤产量达到 $30.5 \times 10^8 \text{ t}$,分别占全国一次能源生产和消费总量的 70%和 65%左右。我国每年因为采煤使大约 $67 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的甲烷气体排入大气层(联合国调查报告称中国甲烷排放量达 $194 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占全球甲烷排放量的 1/3),即浪费能源又污染环境,是构成大气温室气体的主要来源。1949 年以来,全国煤矿已发生煤与瓦斯突出 15000 余次,约占世界同期瓦斯突出总量的 1/3,对我国煤矿高效安全生产构成重大威胁。煤层气是主要以吸附状态赋存于煤层之中的一种自生自储式非常规天然气。它是一种新型的洁净能源和优质化工原料,是我国在 21 世纪的重要接替能源之一。开发利用煤层气以降低煤炭消费,不仅可以增加高效洁净能源供给,而且可以直接减少煤矿甲烷排放量,有效缓解温室效应。同时,随着煤矿开采向深部的延伸,赋存于地下的煤层气对煤矿安全生产构成重大危害。如果在采煤前将煤层气开采出来,就会从根本上消除矿井瓦斯灾害的隐患,提高煤矿安全生产的保障程度和生产的经济效益^[1~6]。因此,开展煤层气资源开发利用具有重要的理论与实际应用意义。

煤层气开发地质学是研究煤层气开发工程活动与煤层气赋存地质条件之间相互作用和相互影响的一门学科;也就是研究与煤层气开发工程活动有关的地质条件及其评价、预测及有效开发的科学。煤层气是以吸附态赋存于煤储层孔隙-裂隙中的非常规天然气,且具有独特的成藏富集规律和控制条件。煤层气开发也不同于常规天然气开发,是通过抽排煤层中的地下水,从而降低煤储层压力使煤层中吸附的甲烷气释放出来的过程。

煤层气开发工程活动与煤层气赋存地质条件之间的相互关系,一方面表现为煤层气赋存地质条件对煤层气开发工程活动的制约作用。煤层气与常规天然气一样,在地下赋存也是非均匀分布的,在一定的地质条件下,可在一定范围内相对富集。煤层气的赋存状况与煤储层的生气条件、储气条件和保存条件密切相关,这些因素相互耦合作用决定了煤层气在储层中的富集程度,从而控制着煤层气的开发效果。如我国晚古生代煤盆地聚煤期后历经印支、燕山和喜马拉雅等不同期次、不同性质、不同规模的挤压、剪切和伸展等不同构造作用的叠加改造,在煤系地层中普遍发育构造煤。构造煤尤其是构造煤中的糜棱煤发育地区,煤层含气量往往较高,但是由于煤的原生结构遭受破坏而降低了煤层渗透能力,同时由于煤层松软而不能形成裂隙系统,进而煤层气可解吸气率降低,残余气多,这不仅对煤矿安全构成威胁,同时也不利于煤层气的开发。另一方面表现为煤层气开发工程活动对煤层气赋存地质条件产生的影响。如在煤层气开发过程中,随着水、气介质的排出,煤储层赋存环境条件发生改变,煤储层压力逐渐下降,导致煤储层有效应力增加,煤储层微孔隙和裂隙被压缩和闭合,煤体发生显著的弹塑性变形,从而使煤储层渗透率明显下降,直接影响煤层气开采效果。因此只有针对煤层气开发地质条件实际,从煤的物质组成及其基本物理化学性质分析入手,把煤储层条件与煤层气赋存环境