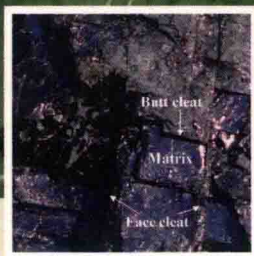


国家自然科学基金项目(编号: 41372163 和41172145)

山西省煤基重点科技攻关项目(编号: MQ2014-01 和MQ2014-12)

山西省煤层气联合研究基金项目(编号: 2012012014 和2014012001)

“十三五”国家科技重大专项(编号: 2016ZX05067001-006)



煤矿区煤层气开发地质与工程

孟召平 刘世民 著

Coalbed Methane Development Geology
and Engineering in Coal Mining Area

非
外
借



科学出版社

国家自然科学基金项目(编号: 41372163 和 41172145)

山西省煤基重点科技攻关项目(编号: MQ2014-01 和 MQ2014-12)

山西省煤层气联合研究基金项目(编号: 2012012014 和 2014012001)

“十三五”国家科技重大专项(编号: 2016ZX05067001-006)

煤矿区煤层气开发地质与工程

孟召平 刘世民 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对我国煤矿区煤层气开发的特点,从煤层气形成的地质条件分析入手,系统开展煤储层条件包括煤的吸附-扩散性能、煤储层含气性及其受控机制、煤储层孔渗性及其控制机理等方面研究,揭示煤储层吸附、扩散和渗流规律及其控制机理;在此基础上,系统介绍煤层气开发工程及井网优化方法、煤储层地应力条件及水力压裂效果评价、煤层气井排水降压规律及其排采强度确定方法和煤层气井排采中煤储层渗透率动态规律及产能评价等煤矿区煤层气开发工程及关键技术,揭示煤层气开发过程中煤储层应力、压力及其渗透性的动态变化规律,建立其评价模型与方法;最后,针对煤矿区实际,进一步介绍煤矿采空区煤层气资源评价及其抽采技术,为煤矿区煤层气高效开发提供可靠的理论和方法。本书是在作者2010年出版的《煤层气开发地质学理论与方法》的基础上,将研究内容进一步深化和扩展,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。

本书可供煤矿瓦斯抽采和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、油气开发等专业的师生和工程技术人员参考与使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿区煤层气开发地质与工程 / 孟召平, 刘世民著. —北京: 科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055178-8

I. ①煤… II. ①孟…②刘… III. ①煤层—地下气化煤气—工程地质—研究—中国 IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269807 号

责任编辑: 于海云 朱灵真 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第一版 开本: 787×1092 1/16

2018年1月第一次印刷 印张: 23 1/4

字数: 534 000

定价: 138.00 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 世纪的重要替代能源之一。加强煤矿区煤层气开发利用，对保障煤矿安全生产、增加清洁能源供应、减少温室气体排放具有重要意义。

国家高度重视煤层气开发利用和煤矿瓦斯防治工作，“十二五”时期，国家制定了一系列政策措施，强力推进煤层气(煤矿瓦斯)开发利用，煤层气地面开发取得了重大进展，煤矿瓦斯抽采利用规模逐年快速增长，煤矿瓦斯防治工作取得了显著成效。2016 年煤层气地面开发产量为 $44.96 \times 10^8 \text{m}^3$ 、利用量为 $38.09 \times 10^8 \text{m}^3$ ，是 2010 年的三倍；潘庄、樊庄、潘河等重点开发项目建成投产，四川、新疆、贵州等省(自治区)煤层气勘探开发取得突破性进展。2016 年煤矿瓦斯抽采量为 $168.51 \times 10^8 \text{m}^3$ 、利用量为 $80.13 \times 10^8 \text{m}^3$ ，比 2010 年翻了近一番。国家将煤层气(煤矿瓦斯)抽采利用作为防治煤矿瓦斯事故的治本之策，全面推进先抽后采、抽采达标和区域防突，煤矿安全环保效益显著，与 2010 年相比，2016 年煤炭百万吨死亡率由世界平均水平的 100 倍降低至 6 倍。2016 年 11 月 24 日，国家能源局正式对外发布《煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划》，明确了“十三五”期间，新增煤层气探明地质储量达到 $4200 \times 10^8 \text{m}^3$ ，建成 2~3 个煤层气产业化基地；2020 年，煤层气抽采量达到 $240 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中，地面煤层气产量 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ ，利用率达 90% 以上；煤矿瓦斯抽采 $140 \times 10^8 \text{m}^3$ ，利用率达 50% 以上，这些为我国煤层气产业发展明确了方向。

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 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，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。我国煤层气产业发展已进入规模化生产阶段，初步形成了适宜于沁水盆地高阶煤煤层气、鄂尔多斯盆地中阶煤煤层气的勘探开发技术体系，有力地支撑了我国煤层气生产基地的勘探开发。但是，我国煤矿开采地质条件复杂、煤层气开发地质理论与技术研究相对薄弱，特别是对煤中气体吸附-扩散-渗流机理的认识仍然不足，导致煤层气井排采控制不合理，地面煤层气井普遍产量低、不稳定，现有技术难以支撑产业快速发展的问题亟待解决。因此，针对我国煤矿区煤层气开发的特点，研究煤矿区煤层气开发地质与工程，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与煤层气资源具有理论和实际应用意义。

煤矿区煤层气开发地质是煤矿区煤层气开发的基础工作，贯穿于煤与煤层气勘探开发的全过程。《煤矿区煤层气开发地质与工程》是在作者 2010 年出版的《煤层气开发地质学理论与方法》基础上的进一步深化和扩展。本书针对我国煤矿区煤层气开发的特点，从煤层气形成的地质条件分析入手，开展煤储层条件、煤层气开发的工程力学条件以及煤层气

开发过程中煤储层应力、压力及其渗透性动态变化规律和煤矿区煤层气开发工程及关键技术等方面研究,为煤矿区煤层气高效开发提供可靠的理论和方法。本书共10章,第1章绪论、第2章煤层气形成的地质条件、第3章煤的吸附-扩散性能、第4章煤储层含气性及其受控机制、第5章煤储层孔渗性及其控制机理、第6章煤层气开发工程及井网优化方法、第7章煤储层地应力条件及水力压裂效果评价、第8章煤层气井排水降压规律及其排采强度确定方法、第9章煤层气井排采中煤储层渗透率动态规律及其对产能的影响、第10章煤矿采空区煤层气资源评价及抽采技术。全书由孟召平教授和刘世民博士合作完成,其中前言、第2~6章、第7章7.1和7.2节、第8章和第10章由孟召平教授撰写;第7章7.3~7.6节和9章由刘世民博士撰写;第1章由孟召平教授和刘世民博士合作撰写,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[高煤级煤层气储层应力敏感性及其控制机理(编号:41172145,2012~2015年)和煤层气直井开发对煤炭开采底板突水影响机制及其防控研究(编号:41372163,2014~2017年)]、“十二五”国家科技重大专项[山西晋城矿区采气采煤一体化煤层气开发示范工程——复合材料套管在煤层气井中的应用(2011ZX05063-6,2011~2015年)]、“十三五”国家科技重大专项[山西重点煤矿区煤层气与煤炭协调开发示范工程——晋城矿区寺河井区采空区特征及煤层气资源评估(2016ZX05067001-006,2016~2020年)]、山西省煤基重点科技攻关项目[废弃矿井采空区地面煤层气抽采技术研究及示范(编号:MQ2014-12)和山西省煤层气成藏模式与储层评价(编号:MQ2014-1,2015~2017年)]、山西省煤层气联合研究基金项目[煤与煤层气共采的地应力条件及其对煤层气井产能影响(编号:2014012001)]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李国庆博士、李国富博士、田永东博士、郭彦省博士、王保玉博士、陈振宏博士后、师修昌博士、张娟博士、许小凯博士、刘金融博士、阎纪伟博士、章朋博士,以及张纪星硕士、刘贺硕士、朱波霖硕士、路波涛硕士、王宇红硕士、李超硕士等。硕士研究生尹可、李博、张森、卢易新等对本书的部分资料进行了收集整理。在此特表谢意!

本书研究工作自始至终得到中国矿业大学和中国矿业大学(北京)彭苏萍院士、武强院士、王延斌教授、曹代勇教授、程久龙教授、秦勇教授、傅雪海教授、朱炎铭教授、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、刘钦甫教授和朱国维教授等,中国石油大学(北京)张遂安教授、程林松教授、杨进教授和张广清教授,中国地质大学(北京)汤达祯教授、刘大锰教授、李治平教授和唐书恒教授,中国地质大学(武汉)王生维教授和李国庆副教授,中国科学院大学侯泉林教授和琚宜文教授,太原理工大学曾凡桂教授和宋晓夏博士,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,山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司王保玉教授级高工、付峻青教授级高工、郝海金教授级高工、李国富教授级高工、田永东教授级高工和白建平教授级高工等,煤炭科学研究总院西安研究院、中国石油华北油田分公司、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、中国石油化工股份有限公司华东分公司和中联煤层气有限责任公司以及山西蓝焰煤层气集团有限责任公司的领导、专家和工程技术人员的关心与指导,在此表示衷心的感谢。同时,还要感谢书中引用文献作者的支持和帮助。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号:41372163和41172145)、山西省煤基重

点科技攻关项目(编号: MQ2014-01 和 MQ2014-12)、山西省煤层气联合研究基金项目(编号: 2012012014 和 2014012001)、“十三五”国家科技重大专项(编号: 2016ZX05067001-006)以及多项部门科研课题的资助,在此表示衷心的感谢。

由于煤矿区煤层气开发地质与工程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。因此书中不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017年8月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 煤层气开发的目的是与意义	1
1.2 煤层气开发的国内外研究进展	2
1.2.1 国外研究进展	2
1.2.2 国内研究进展	5
1.3 煤层气开发地质研究的内涵	7
1.3.1 煤层气成藏地质条件	8
1.3.2 煤层气赋存环境条件	10
1.3.3 煤储层工程力学条件	11
1.4 本书研究的内容	12
参考文献	13
第 2 章 煤层气形成的地质条件	17
2.1 概述	17
2.2 成煤植物及其演化	17
2.3 煤的物质组成	19
2.3.1 煤的岩石学组成	19
2.3.2 煤的化学组成	26
2.4 成煤作用	32
2.4.1 煤层的形成	32
2.4.2 煤化作用及其特征	34
2.5 煤的变质类型及变质程度	36
2.5.1 煤的变质类型	36
2.5.2 煤的变质程度	38
2.6 煤层气形成及其赋存的分带性	42
2.6.1 煤层气的成因	42
2.6.2 煤层气的成因类型	44
2.6.3 煤层气赋存的分带性	47
参考文献	49
第 3 章 煤的吸附-扩散性能	50
3.1 概述	50
3.2 煤中气体吸附-扩散性能与分析方法	50
3.2.1 固-气吸附机理	50

3.2.2	等温吸附模型及其吸附实验方法	51
3.2.3	煤中甲烷扩散参数的计算方法	59
3.2.4	煤中甲烷扩散性能	67
3.3	煤体结构及其吸附性能	73
3.3.1	煤体结构及其分类	73
3.3.2	煤体结构测井响应特征	75
3.3.3	不同煤体结构煤的吸附性能	81
3.3.4	温度和压力对煤体吸附性能的影响	84
3.3.5	煤的粒径对煤体吸附性能的影响	85
3.4	等温吸附过程中能量变化规律	87
3.4.1	固体对气体的吸附机理	87
3.4.2	等温吸附过程中的能量计算	88
3.4.3	不同煤体结构煤吸附热力学特征	90
	参考文献	92
第4章	煤储层含气性及其受控机制	95
4.1	概述	95
4.2	煤层气的赋存状态及气体组分特征	95
4.2.1	煤层气的赋存状态	95
4.2.2	煤层气的气体组分特征	97
4.2.3	煤层甲烷碳同位素特征	99
4.3	煤储层含气性	101
4.3.1	煤储层含气性参数	101
4.3.2	甲烷碳同位素与煤储层含气性关系	110
4.4	煤储层含气性的受控机制	111
4.4.1	构造对煤层含气性的影响	111
4.4.2	煤变质作用对煤层含气量及甲烷碳同位素的影响	112
4.4.3	煤层埋藏深度对煤层含气量及甲烷碳同位素影响	115
4.5	基于测井参数的煤层含气量预测方法	117
4.5.1	煤层含气量与测井参数相关性分析	117
4.5.2	煤层含气量预测的BP神经网络模型	120
	参考文献	123
第5章	煤储层孔渗性及其控制机理	126
5.1	概述	126
5.2	煤的孔隙性	126
5.2.1	煤的孔隙结构及其测试方法	126
5.2.2	不同煤阶煤的孔隙结构特征	131
5.2.3	不同煤体结构煤的孔隙结构特征	138
5.3	煤储层渗透性及其测试分析	142

5.3.1	煤储层渗透性及其受控因素	142
5.3.2	煤储层渗透性测试及其评价分类	148
5.4	不同应力下煤储层渗透性试验及控制机理	151
5.4.1	试验条件与方法	151
5.4.2	煤储层应力敏感性评价参数	152
5.4.3	渗透性与应力之间关系及模型	153
5.4.4	煤储层应力敏感性影响因素	157
5.4.5	应力对煤储层渗透性的控制机理	163
	参考文献	166
第6章	煤层气开发工程及井网优化方法	169
6.1	概述	169
6.2	煤层气地面开发工程	169
6.2.1	钻井工程	169
6.2.2	压裂工程	174
6.2.3	作业工程	177
6.2.4	排采工程	178
6.2.5	煤层气集输与利用工程	181
6.3	煤与煤层气协调开发工程	182
6.3.1	煤与煤层气协调开发模式	183
6.3.2	煤与煤层气协调开发技术	184
6.4	煤层气地面开发井网优化方法	187
6.4.1	井网优化参数	187
6.4.2	煤层气开发井网优化实例分析	189
6.5	煤矿区煤层气井工厂化开发技术	199
6.5.1	工厂化开发井型、井网优化方法	199
6.5.2	煤矿区煤层气井模块化布置	199
6.5.3	煤矿区煤层气井集中化作业	200
	参考文献	201
第7章	煤储层地应力条件及水力压裂效果评价	203
7.1	概述	203
7.2	岩体中地应力及其分布规律	203
7.2.1	岩体中地应力	204
7.2.2	鄂尔多斯盆地东南缘煤储层地应力分布规律	206
7.2.3	最小水平主应力、垂直主应力和储层压力之间的关系	208
7.3	煤层气井排采中煤储层地应力动态变化规律	213
7.3.1	常规油气储层孔隙压力变化引发的储层应力耗散理论	214
7.3.2	煤储层压力变化引发的储层应力耗散规律	215
7.4	煤储层压裂机理的实验研究	219

7.4.1	实验条件	220
7.4.2	实验结果	221
7.5	煤储层水力压裂裂缝扩展的受控因素	222
7.5.1	应力对裂缝扩展的影响	222
7.5.2	天然裂缝对水力压裂裂缝扩展的影响	224
7.5.3	煤、岩力学性质对水力压裂的影响	226
7.6	煤储层水力压裂效果评价	227
7.6.1	测斜仪在煤层水力压裂裂缝监测中应用	227
7.6.2	不稳态返排分析法在压裂效果评估中应用	228
	参考文献	233
第8章	煤层气井排水降压规律及其排采强度确定方法	237
8.1	概述	237
8.2	煤层气产出机理	237
8.2.1	煤层气解吸过程	238
8.2.2	煤层气的扩散过程	239
8.2.3	煤层气的渗流过程	241
8.3	煤层气井排采初期井底流压动态模型	242
8.3.1	外边界无限大、内边界定产条件下井底流压动态预测模型	243
8.3.2	外边界无限大、内边界非定产条件下井底流压动态预测模型	244
8.3.3	两种模型应用实例分析	245
8.4	单井与群井排水降压模型	247
8.4.1	单井排水降压模型	247
8.4.2	群井储层压降漏斗计算模型的建立	249
8.5	煤层气井排水降压数值模拟分析	250
8.5.1	单井压降漏斗的形状控制	250
8.5.2	群井压降漏斗的形状控制	255
8.5.3	煤层气井排采效果分析	262
8.6	煤层气井排采强度确定方法	264
8.6.1	煤储层流速敏感性实验研究	264
8.6.2	煤层气井排采强度理论计算	273
8.6.3	延川南区块合理排采强度计算分析	275
	参考文献	280
第9章	煤层气井排采中煤储层渗透率动态规律及其对产能影响	282
9.1	概述	282
9.2	有效应力效应	283
9.2.1	有效应力与煤基质和孔隙变形的本构关系	283
9.2.2	有效应力对渗透率的影响	286
9.3	煤基质收缩效应	289

9.3.1	吸附变形的定义	289
9.3.2	吸附变形模型	290
9.3.3	吸附变形的测量	292
9.4	滑脱效应	295
9.5	煤储层渗透率动态预测模型	297
9.5.1	常见的渗透率模型	297
9.5.2	基质收缩在渗透率演化过程中的主导作用	305
9.5.3	煤储层渗透率动态变化规律	306
9.6	煤储层渗透率动态变化对产能的影响	310
9.6.1	煤层气排采数值建模	310
9.6.2	煤层气排采数值模拟基础案例	312
	参考文献	315
第 10 章	煤矿采空区煤层气资源评价及抽采技术	318
10.1	概述	318
10.2	煤炭开采围岩应力-应变和破坏规律	318
10.2.1	煤炭开采围岩应力	319
10.2.2	煤炭开采围岩移动变形	323
10.2.3	煤炭开采围岩破坏	326
10.2.4	煤炭开采围岩渗透性	329
10.3	采空区煤层气赋存特点	335
10.3.1	采空区煤层气赋存状态	335
10.3.2	采空区煤层气的气体组分特征	336
10.4	煤矿采空区煤层气资源量计算方法	337
10.4.1	采空区孔隙体积计算模型	337
10.4.2	采空区含水饱和度计算模型	339
10.4.3	煤矿采空区煤层气资源量计算模型	340
10.5	晋城矿区典型煤矿采空区资源量计算实例	341
10.5.1	典型煤矿采空区	342
10.5.2	采空区资源量计算	346
10.6	煤矿采空区煤层气抽采条件与技术	349
10.6.1	煤矿采空区煤层气抽采条件	349
10.6.2	采空区煤层气抽采工艺与技术	354
	参考文献	359

第 1 章 绪 论

1.1 煤层气开发的目的是与意义

我国是一个煤炭资源大国(资源量约为 5 万亿 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。2016 年全国累积原煤产量达到 34.1 亿 t,分别占全国一次能源生产和消费总量的 70%和 63%左右。我国高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井占矿井总量的 46%,瓦斯是煤矿安全生产的“第一杀手”。随着煤炭开采深度的增加,煤层含气量和矿井瓦斯涌出量呈递增趋势,在煤炭生产过程中,瓦斯安全问题一直是影响煤矿安全生产的关键因素,因此加快煤层气(俗称:煤矿瓦斯)抽采利用,对保障煤矿安全生产、增加清洁能源供应、减少温室气体排放和保护生态环境具有重大的意义。

煤层气开发是通过特定的工程及开发方式来改变煤层气赋存环境条件使煤储层条件发生变化并产出煤层气的过程^[1-2]。煤矿区煤层气开发包括煤矿开采区(煤矿生产区和准备区)和原岩应力区(煤矿远景区)煤层气开发。煤矿开采区煤层气资源抽采主要是借助煤炭开采工作面和巷道,通过煤矿井下抽放、煤矿采动区抽放和采空区抽放等工艺方法开采煤层气资源,其中煤矿井下煤层气抽放技术比较成熟;煤矿采动区抽放充分利用煤炭开采过程中形成的采动影响带来开采煤层气资源;采空区抽放是在对煤矿开采稳定区也就是采空区井下或地面煤层气井负压抽采煤层气^[3-13]。煤层气地面开发是指综合利用垂直井或定向井技术、储层改造技术和排水降压采气技术来开采原岩应力区煤层气资源的开发方式,形成了比较成熟的煤矿区煤层气开发技术。

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,美国从地面开发煤层气技术突破以后,煤层气作为一种非常规天然气资源,日益受到世人关注。随着美国煤层气地面开采的成功和对煤层气商业价值与能源战略地位认识的不断提高,我国开始参考美国的有关理论进行煤层气地面开发的研究和先导试验。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,创建了沁水盆地南部煤层气开发示范工程。近 10 年来,在我国政府的大力扶植下,我国煤层气产业得到了迅速发展,截至 2016 年底,我国施工各类煤层气井达 18000 余口,煤层气地面开发产量达 44.96 亿 m³、利用量达 38.09 亿 m³,是 2010 年的 3 倍,潘庄、樊庄、潘河等重点开发项目建成投产,四川、新疆、贵州等省(自治区)煤层气勘探开发取得突破性进展,我国煤层气产业发展已进入规模化生产阶段,初步形成了适宜沁水盆地高阶煤煤层气、鄂尔多斯盆地中阶煤煤层气的勘探开发技术体系,有力地支撑了我国煤层气生产基地的勘探开发。但是,我国煤矿开采地质条件复杂、煤层气开发地质理论与技术研究相对薄弱,特别是对煤中气体吸附-扩散-渗流机理的认识仍然不足,导致煤层气井排采控制不合理,地面煤层气井普遍产量低、不稳定,现有技术难以支撑产业快速发展的问题亟待解决。因此针对我国煤矿区煤层气开发的特点,研究煤矿区煤层气开发地质与

工程,发展我国煤层气开发地质理论与方法,对于合理有效地开发我国煤与煤层气资源具有理论和实际应用意义。

国家高度重视煤层气开发利用和煤矿瓦斯防治工作,“十二五”时期,国家制定了一系列政策措施,强力推进“先抽后建、先抽后采、应抽尽抽”,为煤层气开发利用提供了发展空间。2016年煤矿瓦斯抽采量168.51亿 m^3 、利用量80.13亿 m^3 ,比2010年翻了近一番。国家将煤层气抽采利用作为防治煤矿瓦斯事故的治本之策,全面推进先抽后采、抽采达标和区域防突,煤矿安全环保效益显著,与2010年相比,2016年煤炭百万吨死亡率由世界平均水平的100倍降低至6倍。2016年11月24日,国家能源局正式对外发布《煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划》。明确了“十三五”期间,新增煤层气探明地质储量4200亿 m^3 ,建成2~3个煤层气产业化基地;2020年,煤层气抽采量达到240亿 m^3 ,其中地面煤层气产量100亿 m^3 ,利用率90%以上;煤矿瓦斯抽采140亿 m^3 ,利用率50%以上,这些为煤层气产业发展明确了方向。因此,随着煤层气勘探工作的不断深入,为保证煤层气勘探开发的持续性发展,逐步形成煤层气规模化与商业化开发,迫切需要对煤矿区煤层气开发的地质条件和开发技术进行系统研究,为发展我国煤层气开发地质理论与方法、合理有效地开发我国煤层气资源提供理论依据。

1.2 煤层气开发的国内外研究进展

1.2.1 国外研究进展

目前世界上有30余个国家或地区开展煤层气勘探、开发和研究活动,美国是目前产量最大、勘探开发技术领先的国家,加拿大和澳大利亚近些年快速形成了煤层气产业规模^[2]。

美国是世界上地面开采煤层气最早和最成功的国家,美国有较为丰富的煤层气资源,煤层气资源量约为19.82万亿 m^3 ,占世界第四位^[14]。美国现有14个主要含煤盆地,1200m埋深以浅的煤层气资源量为11.0万亿 m^3 。美国煤层气资源主要分布在西部的落基山脉中——新生代含煤盆地,约占美国84.2%的煤层气资源,其余15.8%分布在东部阿巴拉契亚和中部石炭纪含煤盆地中^[15-32]。

自从美国于1810年,法国于1845年,分别发生了该国的第一次有记载的煤矿瓦斯爆炸以来,在地下开采煤炭过程中煤层瓦斯一直被认为是影响煤炭安全开采的主要因素,没有从资源角度加以利用。20世纪70年代中期对美国井工烟煤煤矿的调查表明,煤炭开采排放的瓦斯引起大气温室效应受到关注,在调查瓦斯排放到大气层的过程中,越来越清楚地认识到从井工烟煤煤矿排出的甲烷是一种清洁能源。1975年,美国矿业局(US Bureau of Mines)在阿拉巴马州的煤矿进行煤层瓦斯抽采示范项目,该项目的成功极大地推进了商业煤层气开发的进程,在1976年成功打出第一口商业性生产煤层气井,煤层气开发取得实质性进展。

1980年,美国国会颁布了税收抵免政策,刺激并资助包括煤层气在内的非常规气资源开发、生产和利用。1983年,美国天然气研究所(Gas Research Institute of the United States)开展煤层气资源地质调查,对煤层气形成、赋存分布及其可采性等方面进行了系统研究,进一步推动了煤层气快速发展。1983年,165口生产井共产出煤层气约1.7亿 m^3 。1984年,阿拉巴马州石油和天然气委员会(State of Alabama-Oil and Gas Board)制定了世界上第一份煤层气工

业开发的规范，其后成为美国其他州和世界其他国家制定煤层气开发项目管理的模板，美国成为世界上第一个对煤层气进行工业性开发的国家。

由于美国政府税收优惠政策的具体实施和开采技术的不断提高，煤层气作为一种非常规天然气资源，日益受到世人关注，从20世纪80年代初期至20世纪90年代末期，煤层气产业呈现快速发展趋势，煤层气成为美国国内天然气市场供应的重要组成部分。1991年全美煤层气生产量为88.6亿 m^3 ，到1999年，共有14000口井生产煤层气产量约354亿 m^3 。到2001年已增长到401亿 m^3 ，在2007年达到煤层气产量高峰，年产量达到496亿 m^3 。2007年至今，煤层气产生量呈逐年下降趋势，在2015年降至359亿 m^3 。图1-1显示了美国近27年的煤层气年产量。煤层气产量的大幅下降主要是因为美国主要油气公司在美国页岩气革命的影响下，对煤层气的钻井投资大幅下降以及自从2014年来持续低迷的美国国内天然气价格所致。但是从2015年以来，煤层气的勘探开发又缓慢复苏，在中阿巴拉契亚盆地、圣胡安盆地、大格林河盆地、拉顿盆地等煤层气新井数量增加较快。美国产量最高的前三个盆地为圣胡安盆地、粉河盆地和黑勇士盆地，其中圣胡安盆地产量约为250亿 m^3 ，粉河盆地产量约为120亿 m^3 ，黑勇士盆地约为40亿 m^3 。其他相对较小的盆地如中阿巴拉契亚盆地、尤因塔盆地和拉顿盆地的煤层气年产量约为30亿 m^3 ，此外，还有几个盆地的煤层气年产量小于2亿 m^3 ，如皮申斯盆地、北阿巴拉契亚盆地、大格林河盆地等。

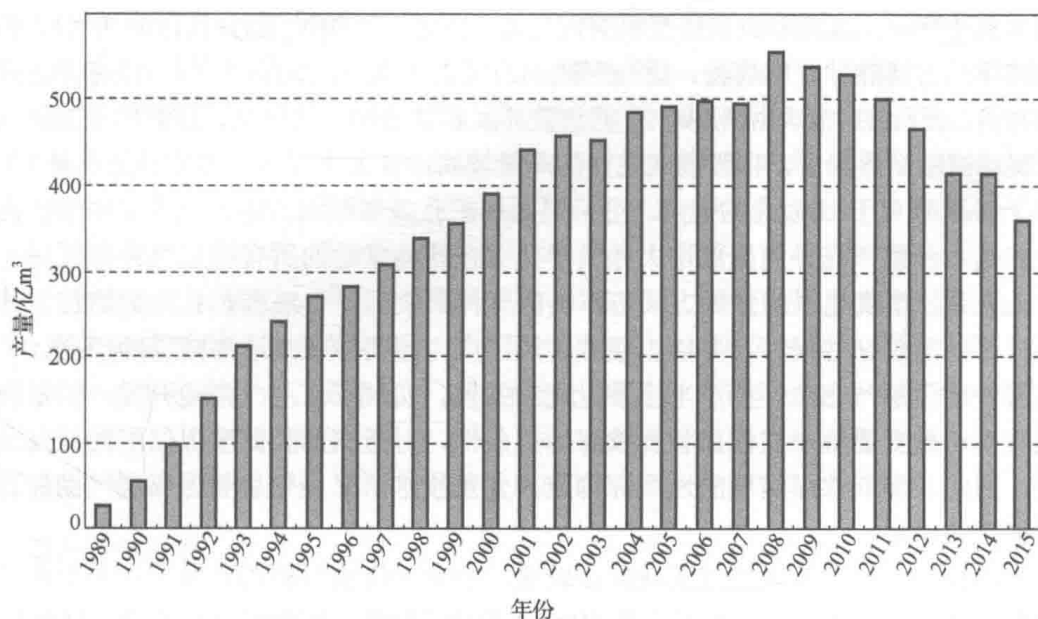


图 1-1 美国煤层气年产量变化图

数据来源：EIA，2017^{[15]、[16]}

随着煤层气开发项目的发展，钻井技术显著提高，形成了从地面开发煤层气关键技术，形成了地面煤层气开发的“排水-降压-采气”的理论与方法，从煤层气气藏的双重孔隙和各向异性以及地层条件下研究甲烷气的解吸-扩散-渗流机理，形成了中煤阶煤层气成藏富集理论和地质选区技术、北美西部洛基山造山带高产走廊的煤层气成藏模式、低煤阶厚煤层低含气量评价方法及低煤阶高饱高渗理论与方法，但对高煤阶煤层气缺乏相应的有效地质评估技术。在煤层气开发技术方面，美国已形成了低煤阶高渗区空气钻井和裸眼射孔完井技术（粉河盆地）、裸眼

洞穴完井技术(圣胡安盆地)、中煤阶中渗区直井压裂排采技术(黑勇士盆地)、中高煤阶低渗区直井压裂技术、羽状水平井开发技术(中阿巴拉契亚和阿尔科马盆地)等成熟技术。

在煤层气储层渗透率小于 3md(毫达西)时,通常可采用多分支水平井开采煤层气。多分支水平井的布置可以是多种形式的,有三支水平井、四分支水平井、羽状水平井等。根据地质条件,羽状水平井布井尽可能全面地覆盖煤储层,以便能更快地促进气体流动,能最有效地回采煤层气资源。单井日产气 3.4 万~5.6 万 m^3 ,比直井产量提高 10 倍,8 年采出可采储量的 85%,该方法综合成本低、经济效益好。在工程实践中,由于煤层气水平井采用无衬和无筛管完井方式,可能导致塌孔,阻碍气体的流动,影响煤层气井的长期抽采效果^[21]。

美国商业煤层气开采中煤储层渗透率多处于 3~20md。一般在煤储层中布设单水平井开采,以保证单井产量。现场试验表明,煤储层中布设一个水平井与其煤储层压裂的垂直井进行采收量对比时,发现前者的气体采收量是后者的 3~10 倍^[19, 21]。煤储层渗透率为 3~20md 储层的另一个选择是水平井标准压裂。在圣胡安盆地,水平井压裂的应用比较广泛,但因煤层压裂的效果的差异性,其压裂工艺还有待进一步完善。

对于渗透率为 20~100md 的煤储层,煤层气完井方式主要有:裸眼洞穴完井、地面钻孔水平井和高渗透压裂完井。裸眼洞穴完井是在裸眼完井的基础上发展起来的一种独特的煤层气完井方式。在较高的生产压差作用下,利用井眼的不稳定性,在井壁煤岩发生破坏后,允许煤块塌落到井筒中,进而形成自然裸眼洞穴完井;或者人工施加压力(从地面注气),使井壁煤层发生破坏,再清除井底的煤粉,进而形成动力或人工裸眼洞穴完井^[21]。该完井方式得益于扩大的井筒,而且在井筒周围形成一个剪切破坏区和渗透率增大区域,这有助于加速气体的抽采。从现场试验结果来看,裸眼洞穴完井的产量较高,且大大高于压裂完井的产量^[20, 24]。

对于渗透率大于 100md 的储层,可采用底部扩孔或裸眼洞穴方式完井。底部扩孔与裸眼洞穴方式基本一致,在井筒底部增大井筒半径。在粉河盆地的所有煤层气井都采用了底部扩孔的方式完井,事实也表明这种方式可以提高气体采收率^[21]。底部扩孔不但增加了井筒的半径,而且可以消除钻井损坏,并能克服井壁周围应力损伤导致渗透率降低的问题。

尽管美国煤层气工业经历了半个多世纪的发展,实现了煤层气商业开发,但是现在的成功开发案例还是主要集中在浅部和高渗煤储层条件,对于深部和低渗煤储层的开发还处于探索阶段,因此开展低渗煤储层的地质评价及其开发技术研究是今后美国煤层气勘探开发研究中需要解决的问题。

与美国相比,加拿大煤层气工业起步较晚。加拿大煤层气勘探开发工作集中在西部的阿尔伯塔省(Alberta)和不列颠哥伦比亚省(British Columbia),为大型沉积盆地,属落基山前陆盆地的一部分,构造变形较弱,地形分布为平原和丘陵地区。含煤地层为三叠纪-白垩纪,含煤面积达 13 万 km^2 ,估计煤炭资源量 7 万亿 t,煤层厚度最大 15m,镜质组反射率 1.0%~2.0%。在西部的阿尔伯塔平原地区煤层资源量为 11.67 万亿 m^3 ,丘陵地区约为 3.7 万亿 m^3 。据统计,加拿大 17 个盆地和含煤区煤层气资源量为 6 万亿~76 万亿 m^3 ^[2]。2002 年加拿大首个煤层气开发项目启动,项目位于阿尔伯塔省马蹄峡谷地区。在煤层气开发方面并没有照搬美国的经验和技術,而是针对其具体地质特点,研究开发出多煤层连续油管氮气压裂解堵技术,并成功地将该项技术广泛应用于煤层气开发中,大大降低了煤层气开发项目的风险和成本^[33]。加拿大煤层气开发的主要地区位于阿尔伯塔省,其煤层具有独特的地质和生产特性,与美国的煤层有很大差别,阿尔伯塔省(Alberta)的煤田包含数量众多的薄煤层,其煤层含气量和渗透

性各不相同。马蹄峡谷组(Horseshoe Canyon)煤层被认为趋向于“干层”,几乎不产水,曼维尔组(Mannville)煤层埋深较大,为800~2500m,阿得雷组(Ardley)煤层厚,生产一定量的含盐水,阿得雷煤层产水量较小,且水质差异较大。基于阿得雷煤层和曼维尔煤层的测试数据显示,在相当小的距离内煤层的渗透性和气体含量波动范围很大。2002年煤层气产量仅有5亿 m^3 ,2006年煤层气钻井数达到9500口,煤层气产量为60多亿 m^3 ,到2008年每年有6000口生产井,煤层气产量达52亿 m^3 ,全部位于阿尔伯塔省^[34]。截至2010年,共钻了14000口井,年产量约为72亿 m^3 ^[35]。到2015年,加拿大煤层气年产量达145亿 m^3 ^[36, 37]。据AER统计,加拿大煤层气井从2004年约5000口逐渐稳步增长到2010年的2万口;2010~2014年,煤层气生产井保持在2万口左右^[38],其中超过91%的井属于阿尔伯塔省的马蹄峡谷组和腹部河组的较干煤层,大约8%的井属于曼维尔组,且产大量盐水的煤层,少于1%的井属于阿得雷组。当前,马蹄峡谷组和腹部河组的煤层仍然是加拿大煤层气的主要产区。曼维尔组煤层仍然处于探索和评价研究中。相比于美国厚煤层高渗透的特点,加拿大马蹄峡谷组煤储层的突出特点是单煤层薄,煤层含气量低、储层欠饱和,含水饱和度低,基于这些特点,加拿大开发了多煤层共采,氮气或氮气泡沫不携砂压裂工艺技术,成功地实现了大规模煤层气商业开发^[39]。

澳大利亚是在北美之外的煤层气工业发展最为活跃的国家。澳大利亚煤层气开发主要集中在东部的悉尼盆地、鲍恩盆地和苏拉特盆地等,煤层气的开发与利用具有巨大的市场。截至2012年,97%的商业煤层气产自昆士兰州,另外的3%产自新南威尔士州的悉尼盆地^[40]。澳大利亚煤炭可采储量为399亿t,平均甲烷含量为0.8~16.8 m^3/t ,煤层埋藏深度普遍小于1000m,煤层气资源量为8万亿~14万亿 m^3 ,煤储层渗透率多分布在1~10md。澳大利亚煤层气勘探工作于20世纪80年代初期起步,1998年煤层气产量0.56亿 m^3 ,2003~2006年煤层气年产量由538万 m^3 增加到16亿 m^3 ,2007年生产速度快速增长到29亿 m^3 ,2008年为37亿 m^3 ,2011年则为52亿 m^3 ,2003年,煤层气占澳大利亚天然气总产量的3%,截至2010年,煤层气占比已上升至10%^[41]。目前采用煤矿水平钻孔、斜交钻孔和地面钻孔抽采煤层气,同时结合澳大利亚煤层气地质条件实际,开展煤层气地质与开发理论研究,形成了煤储层地应力评价和高渗区预测技术,煤层气开发技术也不断创新,截至2016年底,澳大利亚煤层气生产井为5321口,年产气量达169亿 m^3 。现在澳大利亚煤层气的勘探开发与美国20世纪90年代初期一样,正处在煤层气产业快速发展时期。

1.2.2 国内研究进展

我国煤层气开发可追溯到20世纪50年代的煤矿井下瓦斯抽放。通过60余年的发展,我国的煤矿瓦斯井下抽采技术已由早期仅能对高透气性煤层进行本煤层抽放,逐渐发展到对低透气性煤层进行邻近层卸压抽放。20世纪70年代末,煤炭工业部曾在抚顺、阳泉等高瓦斯矿区以解决煤矿瓦斯突出为主要目的,开展了地面瓦斯抽排试验,但未达到预期的效果^[42-45]。

自20世纪80年代以来,我国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。从1992年开始,原晋城矿务局与中美能源有限责任公司合作在沁水盆地南部晋城矿区潘庄井田开展煤层气勘探和试验^[2],施工了一个7口井组成的井组。1993年完成第一口煤层气参数井(潘1井),1994年施工了潘2

井生产试验井,经压裂、排采,煤层气产量最高峰值达 $10000\text{m}^3/\text{d}$,这是沁水盆地第一口有工业价值的煤层气产气井,从此拉开了我国煤层气商业勘探开发的试验进程,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,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的层系和领域。

1996年,随着中联煤层气有限责任公司的成立,我国煤层气资源的开发步入了基础研究与开发试验并举阶段。我国煤炭系统、石油系统、地矿系统在全国三十多个矿区开展了煤层气勘探开发工作,取得了大量的煤储层物性参数,在煤层气的控气地质因素、区域聚集理论等方面开展了广泛研究^[5],经过多年的煤层气勘探与开发实践,形成了煤层气资源评价与开发地质的理论及方法,如向斜控气理论、上覆地层有效盖层控气理论、构造热事件控气论、地下水动力条件的控气作用以及有利沉积相带控制煤层气的富集等。

针对我国煤层气藏形成的特殊性和勘探开发中存在的问题,2003年以来实施了国家重点基础研究发展规划(973计划)项目——“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”,建立了我国煤层气藏形成分布与经济开采的理论,阐明了我国重点地区煤层气藏的形成机制与展布规律;进一步开展了煤层气开采过程中解吸机理、气/液/固三相体系中流体渗流机理和煤储层变形力学特性等方面的研究,也取得了显著的进展和新的认识^[46-47]。国家实施“大型油气田及煤层气开发”国家科技重大专项,开展了煤层气勘探开发关键技术研究 and 示范工程建设,“十二五”期间,煤层气地面开发利用步伐加快,规划期末煤层气产量、利用量是“十一五”末的三倍。我国煤层气产业发展已进入规模化生产阶段,初步形成了适宜于沁水盆地高阶煤煤层气、鄂尔多斯盆地中阶煤煤层气的勘探开发技术体系,有力地支撑了我国煤层气生产基地的勘探开发。

在煤层气开发技术方面,我国目前主要借鉴美国、加拿大等国的煤层气开发技术,开发技术以直井压裂为主,近年来已开始应用多分支水平井和U形水平井钻井等技术。所有这些理论和技术,为我国煤层气勘探与开发的快速发展奠定了基础和条件。

煤层气地面开发工程及技术主要包括五部分:钻井工程(包括钻井、固井和测井等)、压裂工程(包括射孔和储层压裂)、作业工程(包括设备安装、下抽水泵、安装油管、水管和地面抽水设备、抽油机和螺杆泵等)、排采工程和集输气与利用工程(包括除尘、脱水、脱硫工程)及相关技术^[2-3]。

我国煤矿区煤层气赋存地质条件复杂,煤层埋藏深度大,全国井工煤矿开采深度超过800m的矿井达到200余处,千米深井47处。随着开采深度的增加,地应力、瓦斯含量和压力增大,煤层透气性降低,瓦斯抽采难度进一步加大,采用常规油气技术及国外技术均难以实现高效开发。

煤矿区煤层气开发是煤与煤层气一体化协调开发,包括先采气、后采煤协调开发和采煤采气一体化,即充分利用采煤过程中岩层移动对瓦斯的卸压作用,并根据岩层移动规律来优化抽放方案、提高抽采率等。目前,以保护层卸压和强化预抽技术为代表的区域性瓦斯治理技术(“淮南模式”)在全国有关煤矿区得到了很好的推广应用^[11-13]。

20世纪90年代初,山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司(简称“晋煤集团”)随着东部老区煤炭资源逐步衰竭,煤炭开采不得不向西部新区转移。西部新区煤炭开采面临的主要问题是瓦斯含量太高,生产实践证明仅仅靠传统的瓦斯抽采,不能满足矿井衔接和安全生产