

高等学校教材

煤成(型)气地质学

MEI CHENG (XING) QI DI ZHI XUE

● 主 编 李增学
副主编 魏久传 刘 莹



地 质 出 版 社

煤成(型)气地质学

主 编 李增学

副主编 魏久传 刘 莹

参 编 吕大炜 魏欣伟

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了煤层气地质、煤成气地质、瓦斯地质,以及瓦斯的抽放和利用、煤层气勘探开发技术与进展等方面的基本理论、研究方法与技术,并将上述内容融合在一起,构成一个完整的学科课程体系。特别是重点介绍了煤层气地质及煤层气勘探开发的新理论、新技术与新方法,而且将煤层气地质研究与瓦斯地质研究紧密地结合在一起,反映了煤成气、煤层气和瓦斯地质等领域的最新成果与进展。

本书是高等学校地质工程和资源勘探工程专业,以及煤层气工程专业的教材,也可以作为从事煤层气地质、煤成气地质、瓦斯地质研究的科技工作者、现场技术人员等的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

煤成(型)气地质学/李增学等主编. —北京:地质出版社, 2007. 10

高校教材

ISBN 978-7-116-05512-4

I. 煤... II. 李... III. 石油天然气地质-高等学校-教材 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 163438 号

责任编辑:宫月萱 孙亚芸

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324569 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@ gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张:17

字 数:414 千字

印 数:1—1500 册

版 次:2007 年 10 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:28.80 元

书 号:ISBN 978-7-116-05512-4

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

从能源资源总量来看，我国可称为世界上能源资源丰富的国家之一。我国常规一次性能源储量丰富、分布广泛、质量较好，勘探开发条件也较好，是执行“立足国内，走向世界”能源可持续发展战略的重要物质基础保证。但是，就能源品种以及人均等因素分析，我国又是一个能源资源贫国。因此，要立足我国能源地质特点，积极开发各种与主要能源矿产共、伴生的矿产资源，研究其形成背景与成藏规律，具有重要的战略意义。

从能源结构变化的趋势看，21 世纪将是天然气的世纪，我国天然气工业也将进入黄金发展期。煤成（型）气是主要的天然气成因类型之一，被誉为 21 世纪新能源之一，应加快研究步伐，为我国天然气工业的腾飞做出贡献。自从 20 世纪 80 年代煤成（型）气研究开始至今已经逐步形成了成熟的煤成（型）气地质理论，并有效指导了煤成（型）气的勘探与开发。不仅拓宽了天然气勘探的领域，而且在天然气勘探中获得了明显成效，煤成（型）气探明储量所占比例逐年增高，从而确定了煤成（型）气在天然气资源中的重要地位。20 世纪 80 年代煤成（型）气在天然气总探明储量中所占比例仅为百分之十几，至 2001 年达到了 60% 以上，成为天然气的主要类型。

经过 20 余年来的研发和实践，我国已形成了从煤成（型）气资源评价、地质选区、勘探到地面开发完整的技术方法体系。近年来，在某些关键技术上又有新的突破。特别是煤层气，是我国储量巨大的非常规天然气。根据有关专家分析，这部分天然气的总量可能超过常规天然气的资源量。但是，在煤矿生产阶段，瓦斯是煤矿生产过程中的一大灾害，因此，如何将煤层气地质与瓦斯地质研究结合起来，是天然气工作者需要认真思考的课题和今后的重要任务。

从 20 世纪 50 年代开始的单纯为减少煤矿井下瓦斯灾害为目的的井下瓦斯抽放，到 70 年代末，在几个地区进行钻井抽排煤层气试验，再到 90 年代在全国范围内开展煤层气评价研究和勘探开发试验，特别是进入 21 世纪以来，国家对煤矿瓦斯治理和对开发煤层气资源非常重视，下达了一系列纲领性文件，极大地推动了煤层气资源勘探开发与煤矿瓦斯治理紧密结合的进程。

煤成气也是一种非常重要的天然气，世界上很多国家在开采煤成气。我国一些大型煤产地也是大型煤成气田，如鄂尔多斯地区、华北各含煤区，都隐藏着丰富的煤成气资源。因此，煤成气成藏研究也是天然气地质研究的重要组成部分。

《煤成（型）气地质学》正是为适应当前我国天然气地质研究、勘探开发和人才培养的急需而编写的。由李增学教授等编写的高等学校教材《煤成（型）气地质学》，系统介绍了煤层气地质、煤成气地质、瓦斯地质，以及瓦斯的抽放和利用、煤层气勘探开发技术与进展等方面的基本理论、研究方法与技术，并将上述内容融合在一起，构成一个完整的学科课程体系。特别是重点介绍了煤层气地质及煤层气勘探开发的新理论、新技术与新方法，而且将煤层气地质研究与瓦斯地质研究紧密地结合在一起，将煤层气资源勘探开发与煤矿瓦斯灾害放在一个课程系统中，体现了该教材的科学性、系统性、先进性与完整性。虽然煤层气地质研究、煤层气勘探开发与研究、瓦斯地质研究等方面近年出版的论著比较多，但是，该领域的高等学校教材还很缺乏。因此，该教材的编写完成和出版填补了这方面的空白，并将为我国煤成气与煤层气地质研究人才的培养做出贡献。

煤成（型）气地质学还在发展和完善中，新的理论和模式在不断涌现，特别是煤层气勘探开发新技术发展很快，为煤层气勘探和开发提供了技术保障。相信本书的出版对从事煤成气和煤层地质研究、从事煤矿瓦斯地质研究的技术人员是一个鼓舞和帮助，对地学人才培养也将发挥积极的作用。

中国科学院院士

刘宝珺

2007.9

前 言

从20世纪90年代初开始,国家从优质能源的利用出发,开展了煤层气的勘探与开发试验性研究,取得了实质性的突破与进展。我国石油、煤炭、地矿系统和部分地方政府积极支持和参与这项工作,许多国外公司也积极投资在中国进行煤层气勘探试验。1990年以来,全国已有30多个含煤盆地进行了煤层气勘探钻井,取得了一批储层测试参数和生产参数,在一些地区甚至获得工业气流。1996年国家经委修订了《资源综合利用目录》,把煤层气开发和煤层气发电列入该目录。为了加快我国煤层气开发,国务院于1996年初批准成立了中联煤层气有限责任公司。“九五”和“十五”期间国家科技攻关部设立了煤层气研究和试验项目,同期国家计委设立了“中国煤层气资源评价”国家一类地勘项目。为了推进煤层气的产业化进程和煤矿瓦斯防治工作,2002年以来国家973计划设立了几个大型项目,从基础及应用基础理论的层面对制约我国煤层气发展的关键科学问题,对我国煤矿瓦斯地质特征及突出机理、瓦斯灾害防治等关键科学问题进行系统研究,并将其成果应用于煤层气的勘探开发、煤矿瓦斯治理实践中。

因此,自从20世纪80年代煤成(型)气研究开始至今已经逐步形成了成熟的煤成(型)气地质理论,并有效指导了煤成(型)气的勘探与开发。这不仅拓宽了天然气勘探的领域,而且在天然气勘探中获得了明显成效,从而确定了煤成(型)气在天然气资源中的重要地位。瓦斯地质研究早于煤层气地质研究,因此,瓦斯地质研究的理论与实践也较煤层气勘探开发成熟。但是,煤层气作为资源开发和煤矿瓦斯防治两者的结合则是近几年的事,而只有两者紧密结合起来,才能真正显示出煤层气地质研究、勘探开发的实际意义。

有关煤层气地质研究、煤层气勘探开发与研究、瓦斯地质研究等的论著比较多,特别是进入21世纪以来,煤层气、煤成气研究的成果大量涌现,但是,该领域的高等学校教材却很缺乏,迄今为止还没有一本这方面的专业教材问世,不利于人才培养。随着与煤有关的天然气(特别是非常规天然气)的研究、勘探与开发的不断深入,煤层气、煤成气、煤型气、煤矿瓦斯等概念,以及其间的关系已被广大能源地质工作者认识。《煤成(型)气地质学》正是为

适应当前我国天然气地质研究、勘探开发、煤矿瓦斯地质综合研究和人才培养的急需而编写的，也是编写者近年教学实践的总结。本教材试图系统介绍煤层气地质、煤成气地质、瓦斯地质，以及瓦斯的抽放和利用、煤层气勘探开发技术与进展等方面的基本理论、研究方法与技术，并将上述内容融合在一起，构成一个完整的学科课程体系。特别是试图重点地介绍煤层气地质及煤层气勘探开发的新理论、新技术与新方法，将煤层气资源勘探开发与煤矿瓦斯灾害放在一个课程系统中，以体现本教材的科学性、系统性、先进性与完整性；试图通过本教材的编写完成和出版以填补这方面的空白，为我国煤成气与煤层气地质研究人才的培养做出贡献。本教材编写过程中重点参考了张新民、宋岩、叶建平、赵庆波、李明潮、张子敏、林柏泉、张铁岗、苏现波等同志的著作，并在每章的后面提出了建议进一步阅读的文献目录，这样有利于读者更全面地了解学科的系统知识，也体现了本教材的特色。

目前，煤成（型）气地质学还处在发展和完善之中，新的理论和模式还在不断涌现，特别是煤层气勘探开发新技术、开发工艺发展很快，为煤层气勘探和工业进展提供了技术保障。但愿本书的出版对从事煤成气和煤层气地质研究、从事煤矿瓦斯地质研究的技术人员是一个帮助，对地学人才培养也将发挥积极的作用。

本书为山东省教改项目资助成果之一。

感谢中国科学院院士刘宝珺教授对本教材编写与出版的关心、支持！感谢刘院士在百忙之中为本书作序，对本书的出版给以充分肯定和鼓励！感谢山东科技大学领导给予的大力支持！研究生陈丽、马收先、宋洪柱、王东东、王林涛、官萍萍等进行了资料整理、插图清绘、文献检索等工作，对于他们的辛勤工作表示感谢！

本书是高等学校专业教材，读者对象是大学四年级学生，也可以作为从事煤层气、煤成气地质研究的科技工作者、现场技术人员等的参考用书。本书由李增学担任主编，魏久传、刘莹担任副主编，参加编写人员有吕大炜、魏欣伟等。

由于编写时间较短，尚有很多有价值的资料未能及时吸收进本教材中；受水平所限，书中不当之处难免，敬请读者和同行专家批评指正！

作 者

2007.9

目 次

序

前 言

1 绪论	(1)
1.1 有关概念	(1)
1.2 煤成(型)气地质研究及勘探开发简况	(3)
1.3 课程主要内容	(9)
2 煤层气地质	(11)
2.1 煤系、煤层与煤田	(11)
2.2 煤层气的基本特征	(12)
2.3 煤层气的生成	(13)
2.4 煤的孔隙及煤层气	(24)
2.5 煤的吸附特征	(38)
2.6 煤层气储层	(55)
3 煤层气成藏与资源	(61)
3.1 煤层气藏的概念及相关问题	(61)
3.2 煤层气藏的形成和保存	(62)
3.3 煤层气资源评价	(77)
3.4 煤层气资源量的计算	(79)
4 煤成气地质	(89)
4.1 煤系分散有机质	(89)
4.2 煤成气的基本特征	(96)
4.3 煤成气成藏的基本条件	(104)
5 瓦斯地质	(116)
5.1 瓦斯地质基本理论	(116)
5.2 煤层瓦斯的带状分布	(139)
5.3 煤层瓦斯含量及其测定方法	(141)
5.4 矿井瓦斯涌出和矿井瓦斯等级	(145)
5.5 煤与瓦斯突出及瓦斯突出机理	(146)
5.6 影响瓦斯赋存的地质因素	(155)

6 瓦斯利用与防治	(163)
6.1 瓦斯抽放与利用	(163)
6.2 矿井瓦斯的防治	(189)
7 煤层气勘探开发技术与方法	(203)
7.1 煤层气地质评价	(203)
7.2 煤层气钻井	(206)
7.3 煤层气测井	(209)
7.4 完井、固井与试井	(218)
7.5 煤层气生产技术	(219)
7.6 煤层气勘探生产新技术与新方法	(221)
8 中国煤层气地质特征及资源	(226)
8.1 中国煤层气地质背景	(226)
8.2 中国煤层气资源分布特征	(253)
8.3 中国煤层气资源与勘探开发	(257)
参考文献	(261)

1 绪 论

从能源资源总量来看,我国可称为世界上能源资源丰富的国家之一。我国常规一次性能源储量丰富、分布广泛、质量较好,勘探开发条件也较好,是执行“立足国内,走向世界”能源可持续发展战略的重要物质基础保证。但就能源品种以及人口等因素分析,我国又是一个能源资源贫国。从能源资源的地区分布特点看,我国能源资源总量分布是北多南少、西富东贫,能源品种分布是北煤、南水和西油气。能源资源分布和经济布局的矛盾决定了我国能源的流向是自西向东和自北向南。煤炭、石油、天然气和核能是当今世界能源结构中的四大支柱,其中作为优质、洁净的工业燃料、民用燃料以及化工原料的天然气能源将逐步取代石油成为头等重要能源,这种发展趋势已成为国内外许多经济专家与石油地质学家的共识。中国作为世界上最大的发展中国家,目前在能源四大支柱中,煤炭约占75%,天然气仅占2%,同世界水平具有很大差距。

21世纪将是天然气的世纪,我国天然气工业也将进入黄金发展期。由于我国陆上近十年来新发现了3个大型天然气区:塔里木气区、鄂尔多斯气区和柴达木气区,同时四川天然气区勘探获得了重要进展,促使我国天然气探明储量增长十分迅猛。全国陆上四大气区及东海及南海的英琼两大气区(这6个气区勘探程度虽然很低,但近年均有重大发现)正处在储量快速增长期。根据全国第二次油气资源评价,预测全国天然气资源量为 $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$,而目前仅探明 $2.56 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明程度仅为6.7%,因此,勘探潜力十分巨大,加强勘探工作,必有新的重大成果。上述天然气资源量尚不包括致密砂岩气、煤层气、水容气和第四系浅层天然气资源量。特别是煤层气,是我国巨大的非常规天然气,根据有关专家分析,这部分天然气的总量可能超过常规天然气的资源量。

根据成因,天然气可以划分为有机成因气、无机成因气和混合成因气三大类。有机成因、以烃类气体为主的天然气(狭义的天然气),是由沉积有机质或可燃矿产(石油、煤及油页岩)在热演化作用过程中生成的,产于地下岩石中,是目前勘探、开发和工业利用着重研究的类型。这类天然气进一步可划分为生物成因气、油型气和煤成(型)气。

煤成(型)气是主要的天然气成因类型之一,被誉为21世纪新能源之一。自20世纪80年代开始煤成(型)气研究至今已经形成了成熟的煤成(型)气地质理论,不仅拓宽了天然气勘探的领域,而且在天然气勘探中获得了明显成效,从而确定了煤成(型)气在天然气资源中的重要地位。在我国,煤成(型)气探明储量所占比例逐年增高,20世纪80年代煤成(型)气在天然气总探明储量中所占比例仅为百分之十几,至2001年达到了60%以上,成为天然气中的主要类型。由此可见,一种正确的地质理论的建立可以给勘探工作带来飞跃性的变化。

1.1 有关概念

天然气(natural gas)是指在不同地质条件下生成、运移并以一定压力储集在地下构

造、地层或岩性层中的气体，大多数天然气为可燃性气体，其主要成分是甲烷等饱和气态烃类，含有少量非烃气体。在石油地质学中，天然气通常指油田气和气田气。广义的天然气是指地壳中一切天然生成的气体，包括油田气、气田气、泥火山气、煤成气和生物生成气等。

天然气的分类方法目前世界上还不统一，各国都有自己的习惯分类法。我国习惯上将天然气分为气层气、伴生气和凝析气3种。气层气又称气田气，是指在地层中单独聚集成藏、呈气态存在、采出地面后仍为气态的天然气；伴生气也叫油田气，是指在地层中溶解在原油中，或呈气态与原油共存，随原油同时被采出的天然气，如大庆、胜利等油田所产的天然气中大部分都是伴生气；凝析气是指在地层中的原始条件下呈气态存在，在开采过程中由于压力降低而凝结出一些液体烃类（通常叫做凝析油）的天然气，如新疆柯克亚的天然气就属于凝析气。

如果按其形成，天然气可分为油型气、煤成气、生物气和水合物气4种。油型气是石油烃类天然气，是指腐泥型干酪根进入成熟阶段以后形成的天然气；煤成气是指煤系地层中的分散有机质在热演化过程中所生成的天然气；生物气是指不同类型有机质在未成熟阶段由厌氧细菌的生物化学作用形成的天然气；水合物气是在低温高压下，甲烷等气体分子渗入水分子晶隙中化合形成的气体。

通常含煤岩系中形成的天然气泛称煤成气，目前这一术语的含义仍旧存在不同认识，针对煤层气的概念目前认识比较一致，但对于煤成气和煤型气问题的认识仍存在不同看法。张厚福等人认为煤型气是与煤系和煤层有关的天然气的总和，而煤成气是指煤系和煤层在演化过程中所形成的天然气，储集在煤层以外的空间内，煤成气属于煤型气中的一类，即煤型气包括了煤成气和煤层气，这一观点基本上代表了石油地质研究者所定义的概念和观点。唐修义等认为，在特定的地质条件下，煤层和煤系中分散有机质在煤化作用过程中生成的气相运移出母质储集在多孔岩层内而形成有经济价值的天然气藏，称为“煤成气”或“煤型气”。这一观点基本上代表了煤田地质研究者的认识和观点。

本书内容涉及煤成气、煤型气和煤层气，为了叙述和理解上的方便，取书名为《煤成（型）气地质学》。采用张厚福先生的分类，将煤成气、煤层气和煤型气3个概念分开论述。

煤成气指储集在煤层及其夹层以外空间内、与煤层和煤系中有机质演化有关的天然气。该类天然气可能来自煤层（由煤层经煤化作用过程中形成的气相物质运移出来形成），或来自煤系中的分散有机质（这些分散有机质在煤系热演化过程中形成的气相物质运移到储层中），也可能来自二者。

煤层气（coal-bed gas）是指煤层生成的气体经运移、扩散后的剩余量，包括煤层颗粒基质表面吸附气，割理、裂隙游离气，煤层水中溶解气和煤层之间薄砂岩及碳酸盐岩等储层夹层间的游离气，是一种由煤层自生自储的非常规天然气藏。

从广义上讲，煤层气是指储存于煤层及其围岩中的天然气，是由气体化合物与气体元素组成的混合物。其来源一般包括3种，第一种来源是有机质在煤化作用过程中生成的，第二种来源是由于火成岩侵入或碳酸盐受热分解生成的 CO_2 经断层等通道侵入到含煤地层之中，第三种来源是放射性物质蜕变过程生成的或地下水释放出的放射性惰性气体氧及惰性气体氦。第一种为有机成因，第二、三种为无机成因。煤层气的组成一般以甲烷

(包括少量重烃)为主,只在少数情况下以二氧化碳为主(如甘肃窑街矿区),氦、氖等稀有气体含量甚微。

从能源开发利用和煤矿瓦斯的角度,即狭义上讲,煤层气(又称煤层甲烷, coal bed methane)是一种储存于煤层及其邻近岩层之中、以自生自储为主的非常规天然气(张新民等, 1991)。所谓非常规天然气,是对产自常规储气层(如气藏气、气顶气和石油中的溶解气)之外的天然气的总称,包括水溶气、煤层气、页岩气、致密砂岩气等。煤层气的成分以甲烷(CH_4 , 包括重烃)为主,其次为二氧化碳(CO_2)、氮(N_2)气等。本书所论及的皆针对狭义煤层气而言,所有的煤层气含量、煤层气资源量均指甲烷(CH_4 , 包括重烃)的量。

煤型气是相对于油型气而提出的概念,是煤成气和煤层气的总和。

矿井瓦斯(mine gas)是指矿井中主要由煤层气构成的、以甲烷为主的有害气体,来源于矿井生产过程中产生的气体,亦是一种多成分的混合气体。从煤层及煤层围岩中涌出,以及在煤矿生产过程中产生的各种气体(人员呼吸、火药爆破、坑木腐烂以及煤被氧化产生的气体),统称为矿井瓦斯。由于煤层甲烷是矿井瓦斯的主要成分,因而狭义上的矿井瓦斯,即人们习惯上所说的瓦斯,通常指甲烷而言。

1.2 煤成(型)气地质研究及勘探开发简况

1.2.1 世界煤层气开发利用历史与现状

1920年和1931年,美国在粉河盆地(Powder River Basin)中部的怀俄德克煤层和阿巴拉契亚北部比格郎气田的匹兹堡煤层先后打出3口煤层气自流井。20世纪50年代以来,菲利浦石油公司参与圣胡安盆地(San Juan Basin)的煤层气开发,在水果地组煤层打出一大批气井,其中大多数井均获成功。在此期间,采用常规油气理论为指导进行钻井。进入70年代,在全球能源危机的影响下,美国能源部做出了开展包括煤层气在内的非常规天然气回收研究的决定。从1978年开始对美国16个含煤盆地进行了长达8年的煤层气研究。研究过程中对煤层气的储集和运移机理、生产方式和开采工艺有了进一步的认识,先后对14个盆地做出了资源量计算。

20世纪80年代初,美国对煤层气的开发利用取得了重大突破,尤其在圣胡安盆地和黑勇士盆地(Black Warrior Basin)取得了商业性开发的成功(杨锡禄等, 1995)。1986年以后,在取得东部浅层含煤盆地煤层气开发经验的基础上,美国对西部深层含煤盆地展开了研究,并取得了明显的开发效果(张武等, 2000)。

美国煤层气工业在近几年来取得长足进步的关键是对含煤盆地进行了系统、全面的地质综合评价,尤其是在黑勇士盆地、皮申斯盆地及圣胡安盆地开展了大规模的研究和开发试验,根据各地的经验,提出在选择勘探、开发煤层的有利区块进行地质综合评价时,应考虑一系列地质因素,即气含量、渗透性、煤阶、煤层的物理性质、煤层厚度、埋深、地温梯度、地应力、顶底板岩层特征、沉积环境及构造条件等(叶建平, 2006)。其中,煤层厚度、煤阶、气含量、渗透性、埋深和构造条件是选择煤层气开发有利区块时必须优先考虑的因素。

美国煤层气勘探开发情况代表了世界煤层气工业的发展状况。近年来,澳大利亚的煤层气勘探工作也十分活跃,主要集中在东部的几个二叠纪-三叠纪含煤盆地,包括悉尼(Sydney)、冈尼达(Gunnedah)、博恩(Bowen)等盆地,其中博恩盆地的一些井经过测试已经转化为生产井。2000~2001年度,仅博恩盆地用于煤层气勘探的费用就达4440万美元,占该盆地全部勘探费(1.2亿美元)的37%。昆士兰天然气公司已经在靠近Chianchill的Argyle-1井成功进行了煤层气生产,日产量超过 $2.823 \times 10^4 \text{ m}^3$,煤层气的勘探开发已经成为昆士兰石油和天然气工业的基本部分。但直到目前,澳大利亚的煤层气生产还是以矿井煤层气抽放为主,生产的煤层气主要供给建在井口的煤层气发电站。澳大利亚煤层气勘探开发进展较快,主要原因有三:一是澳大利亚煤炭及煤层气资源丰富;二是几个主要含煤盆地离东海岸人口密集区较近,具有潜在的煤层气销售市场;三是在勘探过程中借鉴了美国的成功经验,并与本国的客观地质情况相结合。

除了美国和澳大利亚,世界上其他30多个国家和地区也开始进行煤层气的勘探和开发工作,但是仅有少量的国家能进行成功的煤层气规模开发,主要原因有三:一是煤层气作为一种非常规天然气,其前期工作往往需要很大的资金投入,如果没有税收政策上的优惠,很难吸引资金;二是除美国外,各国不能彻底解决各自的具体技术问题;三是煤层气本身的特殊性,即从地质评价到工业开采一般需要相当长的时间。

1.2.2 我国煤层气开发利用历史与现状

我国煤层气勘探开发起步较晚,20世纪70年代末至90年代初,我国仍以煤矿安全为主要目的进行瓦斯抽放,部分矿井同时进行煤层气开采试验。1980年,我国的瓦斯抽放量已达到 $2.934 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的矿井就有5个。1985年,国家经委修订了《资源综合利用目录》,将瓦斯列入废弃能源,1996年又把煤层气开发和煤层气发电列入该目录。1992年,煤炭部门与联合国开发计划署(UNDP)签订协议,投资1000万美元进行试验,该项目包括松藻矿务局、开滦矿务局、铁法矿务局和煤炭科学研究总院西安分院的4个子项目,主要目的是为我国发展煤层气工业引进技术和设备。这一阶段主要借用美国的技术和经验,但对于地质条件复杂的中国含煤区不太适用,因此未获得突破性进展,但是通过试验,对我国煤层气勘探开发情况取得了一定的认识,为后来的煤层气勘探开发奠定了基础。

从20世纪90年代初开始,我国开展了煤层气的勘探试验,取得了实质性的突破与进展。1990年以来,全国已有30多个含煤盆地进行了煤层气勘探钻井,取得了一批储层测试参数和生产参数,在一些地区甚至获得工业气流。为了加快我国煤层气的开发,国务院于1996年初批准成立了中联煤层气有限责任公司。“九五”和“十五”国家科技攻关项目中都设立了煤层气研究和试验项目,同期,国家计委设立了“中国煤层气资源评价”国家一类地勘项目。为了推进煤层气的产业化进程,2002年,国家“973”计划设立了“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目,从基础及应用基础理论的层面对制约我国煤层气发展的关键科学问题进行系统研究,并将其成果应用于煤层气的勘探开发中。到目前为止,我国施工煤层气井270余口,共有31个区块进行过不同程度的试验,主要集中在华北、东北和华南聚气区,建成煤层气井组12个;探明煤层气地质储量 $10.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$,中联煤层气公司和煤炭科学研究总院西安分院新一轮全国煤层气资源预

测显示,我国煤层气总资源量为 $31.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

1999~2002年,由东煤107队于辽宁省阜新盆地共施工了8口煤层气地面开发井,为阜新市提供日产气量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的居民生活用气,标志着我国煤层气地面钻井商业开发实现了零的突破。2005年,山西省晋城地区投入2.37亿美元建设的国内第一个煤层气综合开发利用示范项目开工,预计2008年建成投产。该项目通过地表向地下煤层钻孔,每年抽取煤层气大约 $1.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,供应当地工业、商业用户和居民作燃料,并建设一座 $12 \times 10^4 \text{ kW}$ 的煤层气发电厂。

1.2.3 我国煤层气勘探开发的进展与趋势

2004~2006年,在国家发展和改革委员会、国土资源部、财政部联合组织下,开展了全国新一轮煤层气资源评价,中联公司、中石油、中石化和中国矿业大学等单位承担了具体评价任务。评价中首次考虑了褐煤中的煤层气资源,首次进行了全国重点矿区煤层气资源评价。

截至目前,我国煤层气探明地质储量为 $1023.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,以地面开发为主探明储量为 $754.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,以矿井抽放为主探明储量为 $268.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.2.3.1 煤层气地面商业性开发取得历史性突破

自2000年阜新矿区实现小规模煤层气地面商业性开发以来,我国在山西南部无烟煤地区数个区块又取得地面商业性开发的突破,昭示出中国特有的煤层气地质特色和商业性开发前景。

1) 辽宁阜新刘家井组煤层气开发工程:1999~2002年,阜新矿区刘家井田施工煤层气井8口,形成小型开发井网,单井平均产气量 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,最高达 $0.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,并于2003年3月1日正式向阜新市区供气,日均供气约 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,在我国率先实现煤层气地面商业性生产。

2) 山西沁水枣园井组煤层气开发试验工程:该工程共有生产试验井15口,建有日发电400 kW的小型煤层气电站,2003年4月开始向外供气。

3) 山西晋城潘庄煤层气地面开发工程:该工程2003年施工30口开发井放大试验并开始商业性生产,目前已形成210口井的开发规模,其中110口已投入生产。日产气量 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$,单井最高产量 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,形成了年产 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 煤层气的生产规模。目前,生产的煤层气除就地发电、居民供气、汽车燃料外,已销往郑州、长治、安阳等地作为民用或工业用气源。

4) 山西晋城潘河煤层气开发利用先导性试验工程:该工程计划施工900口煤层气井,分3期完成。2006年完成第一期施工150口煤层气生产试验井,计划建成年产煤层气约 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的生产示范基地。该基地已于2005年11月1日正式开始对外供应压缩煤层气,日产气约 $7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.2.3.2 煤层气勘探与开发试验活动更为活跃

至2006年8月底,我国完成的煤层气井数约650口(图1.1),其中80%以上分布在山西和陕西两省。20世纪80年代以来,全国投入煤层气勘探开发资金达21亿~22亿元人民币,引进外资约1.8亿美元。在2000年以前30余个勘探或开发试验区的基础上,近

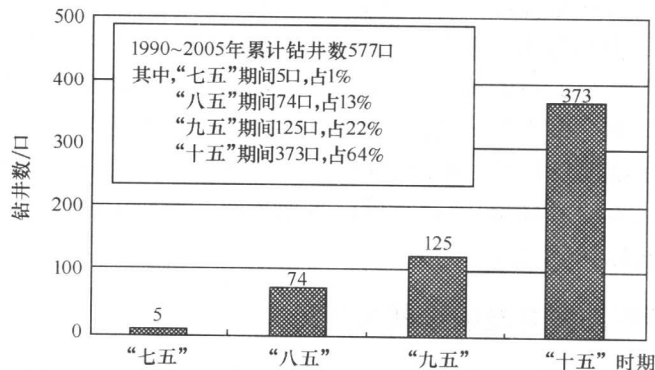


图 1.1 中国各时期煤层气钻井数
(据叶建平, 2006)

年来进一步扩展了新的区块, 目前正在进行作业的区块达到 20 余个, 开发试验规模和技术水平都有极大提高, 对外合作也取得新的进展。目前, 全国已登记的煤层气区块共 64 个, 各方参与煤层气勘探开发活动的热情空前高涨。

除前述 4 个已进行商业性开发的项目外, 目前正在进行的勘探与开发试验的区块有 20 余个, 如中联公司自营或与地方合作的端氏、韩城、鹤岗、沈北等区块; 与国外公司合作的淮南潘谢东、保德、沁源、寿阳、丰城、乌鲁木齐白杨河、盘县青山、云南老厂等区块; 中国石油天然气集团自营的大宁-吉县、宁武、郑庄、樊庄、乌鲁木齐等区块; 晋城兰焰公司自营的潞安屯留、郑庄、成庄、赵庄、胡底等区块。此外, 国内某些大型煤炭企业也积极开展煤层气地面抽采工作, 如铁法、抚顺、淮南、平顶山、焦作、潞安、松藻等。上述工作成效显著, 如在韩城、晋城潘庄、盘县青山等地打出了煤层气自喷井, 揭示了这些地区煤层气资源开发的巨大前景。

在上述区块中, 有五大项目即将投入开发试验: ①韩城项目施工直井 11 口, 加上前期 6 口煤层气井 (平均产气量 $0.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 组成韩城开发试验区; ②晋城端氏区块施工多分支水平井 2 口, 经过排采试验, 单井产气量已达 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右; ③晋城大宁区块施工多水平分支井 5 口, 其中 2000 年底投入排采试验的 DNP02 井产气量稳定在 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右; ④晋城樊庄区块计划施工 200 口直井形成煤层气开发区, 目前数十口井开始进入排采试验; ⑤大宁-吉县形成了由 34 口直井和 1 口多分支水平井组成的开发试验井网, 正在排采试验, 已取得单井 $(0.1 \sim 0.28) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的试验成果。

我国自与美国德士古公司于 1998 年签署国内第一个煤层气产品分成合同 (淮北项目) 以来, 目前先后已与 16 家外国公司签订了 27 个煤层气资源开采产品分成合同, 合同区总面积超过 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。截至 2005 年底, 对外合作区块内已施工各类煤层气井 254 口, 压裂排采 204 口, 施工二维地震 2065 km, 建立了潘庄、柿庄、保德、三交、寿阳、淮北、丰城、恩洪等先导性开发试验井组, 获得了具有商业价值的煤层气产量, 国际合作成效显著。

1.2.3.3 煤层气勘探开发技术进展

经过 20 余年来的研发和实践, 我国已形成了从煤层气资源评价、地质选区、勘探至

地面开发的完整技术方法体系。近年来,在某些关键技术上又有了新的突破。

1) 基于动力学条件的有利区带优选技术:该项技术包括两个方面,一是煤层气储层弹性能聚散程度的三元判识标志,用于煤层气成藏效应的预测;二是煤储层弹性能能量聚散模式,形成了基于该模式的煤层气有利带动力学定量预测方法。采用三元判识标志,将煤层气成藏效应分为3个级别组合和27个类型,有关方法在沁水盆地煤层气富集高渗动力学条件发育区预测中得到了验证,形成了适用于我国地质条件的煤层气有利区带先进预测技术。

2) 煤层气地震勘探技术:在传统的二维和三维地震勘探技术的基础上,开发了三维P波煤层气地震勘探技术,提出利用“两个理论、六项技术”来指导煤层气藏勘探。六项技术包括地震属性技术、地震反演技术、方位AVO技术、方位各向异性技术、煤层厚度非线性反演技术和基于MAPGIS的多源信息预测技术,以岩性地震勘探为核心,形成了先进的煤层气地震勘探技术系列,并在煤层几何形态和裂隙发育程度等的探测中取得了良好的应用效果。

3) 煤层气井空气/雾化钻井技术:结合中国煤层气地质特点,在引进美国相关技术的基础上进一步研制出空气钻井设计软件,形成了空气钻井系列技术。目前,该项技术已在沁水盆地南部潘河国家煤层气开发示范项目中广泛使用,使钻井周期由原来的15 d以上缩短到不足5 d,降低了施工成本,避免了钻井液对储层的伤害。

4) 多分支水平井钻井、排采技术:2004年11月,我国第一口煤层气多分支水平井投入生产,煤层中水平井眼总进尺8000 m,单井日产稳定在 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,实现了煤层气开发工艺和产能的双重突破。截至目前,国内已有14口多分支水平井施工完毕。大宁井田完成3口多分支水平井,目前正在排采;端氏区块实施2口多分支水平井,预测单井产能在 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,并首次实现双主支多分支水平井钻进记录;武M1-1多分支水平井,在煤层中进尺达6088 m;大宁PSC项目,首次实现9000 m总进尺的水平定向钻进记录;寿阳区块多分支水平井3口,正在排采试验。该项技术在我国的应用成功,为我国低渗煤层的煤层气高效开发提供了新的技术途径。

5) 注入二氧化碳增产技术:在“十五”期间,国内开展了注入二氧化碳提高煤层气采收率的先导性试验,研究了适合于我国地质特点的工艺参数,取得了显著的增产效果。2004年4月,完成了山西南部TL-003井的现场二氧化碳注入试验,为我国煤层气产业可持续发展、二氧化碳地下储藏等提供了先进的技术储备。

6) 氮气泡沫压裂技术:氮气泡沫压裂技术主要适应于低压、低渗、强水敏性的煤层。潘河项目完成了2口井的氮气泡沫压裂施工,成功地将单井煤层气日产量提高了3倍左右。潘庄项目进行了氮气泡沫压裂对比试验,试验井煤层气日产量比参照井提高了1倍左右。在韩城开发试验项目中,通过氮气泡沫压裂技术的实际实施,分析了该项技术对特定煤层气地质条件的适应性,为我国应用此项技术积累了宝贵经验。

1.2.4 我国煤层气研究及勘探阶段

我国煤层气勘探开发起步较晚,从20世纪50年代开始至今,大体可分为3个阶段。

1.2.4.1 煤矿瓦斯井下抽放与利用阶段

自20世纪50年代开始到70年代末,我国煤层气勘探开发的主要目的是为减少煤矿

瓦斯灾害而进行的煤矿井下瓦斯抽放与利用。我国煤矿井下抽放煤层气已有较长的历史。1980年,煤层气抽放量已达 $2.934 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的矿井就有 5 个。1996 年,抽放量达 $6.338 \times 10^8 \text{ m}^3$, 抽放量在 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的有 16 个矿区。这些对于减少井下瓦斯事故、保护环境及改善能源结构均有重要意义。瓦斯抽放也是煤层气开发的一项有效技术。

1.2.4.2 煤层气勘探开发试验初期阶段

20 世纪 70 年代末至 90 年代初,我国以煤矿安全为主要目的,部分矿井同时进行煤层气开采试验,并进行了水力压裂试验和研究。这一阶段主要是借用美国的技术和经验,但对于我国地质条件复杂性研究不够深入,因此未获得突破性进展。但是也在煤层气的勘探开发取得了一定认识,积累了一些经验,学到了一些先进技术。

1.2.4.3 煤层气勘探开采试验全面展开阶段

20 世纪 90 年代初至今,我国从优质能源的利用出发,开展了煤层气的勘探试验,取得了实质性的突破与进展。石油、煤炭、地矿系统和部分地方政府积极参与这项工作,并在 20 世纪 90 年代初成立了专门的煤层气研究机构,许多国外公司也积极在中国投资进行煤层气勘探试验。1990 年以来,我国已有 30 多个含煤区煤层气勘探钻井,已钻成勘探和生产试验井 119 口,取得了一批储层测试参数和生产参数,并在柳林、晋城、大城及铁法等含煤区获得了工业气流。这一阶段我国的煤层气勘探,无论是地质选区评价,还是工艺技术都有了突飞猛进的发展,取得了实质性的突破,但对我国复杂地质条件下煤层气的富集高产规律认识还不够深入,工艺技术还未完全过关,煤层气地质选区评价仍是此阶段首要的研究课题。

1.2.5 煤成气地质研究与开发简况

煤成气也是一种非常重要的天然气,世界上很多国家在开采煤成气。我国一些大型煤产地也是煤成气田,如鄂尔多斯地区、华北各含煤区,都蕴藏大量煤成气藏。例如中原油田煤成气的勘探主要集中在东濮凹陷,已找到了文 23、白庙及户部寨等古生新储煤成气田和混合气田,其中文 23 煤成气田已探明地质储量达 $149.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为中原油田的主力气田。2003 年,东濮凹陷文古 2 井于上古生界石千峰组 3813.5 ~ 3834.3 m 井段 (16.8 m/3 层) 进行压裂,日产天然气 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、油 7.0 m^3 。华北苏桥的煤成气聚集于奥陶系,中原的“文 23”煤成气藏和白庙混源气藏聚集于第三系沙河街组。济阳地区的 155 井和孤北 1 井气藏聚集于石炭、二叠系储层内,而曲古 1 井煤层甲烷聚集于第三系沙河街组二段内。

煤成气勘探开发已经具有比较多的研究实践,国内外研究人员取得了很多研究成果 (M. Teichmuller, 1983; B. Waiter 等, 2002; 杨俊杰等, 1987; 戴金星等, 2001; 张新民等, 2002)。

总的看来,国内外煤成气地质研究具有如下发展趋势: ①十分重视煤系有机质的来源和显微组成,并将其与生烃潜力、产气量紧密联系起来; ②分析化验不断采用高新技术,如天然气中微量生物标志物的富集与分析、单体烃同位素分析及含氮化合物分析等; ③采用系统动态的观点,将天然气的生运聚散作为一个动态演化的系统,对该系统的研究不断