



科学版研究生教学丛书

# 煤层气藏工程

冯文光 编著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

科学版研究生教学丛书

# 煤层气藏工程

冯文光 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍煤层气藏基本理论和基本应用。基本理论包括煤层气藏的静态储层评价、动态储层评价和数值模拟。基本应用包括高产稳产井位的最佳确定、最佳井网、最佳井距、数值模拟、试井、整体和单井提高解吸速度、提高产能等煤层气工业化开采的方法。本书特别提出可燃冰气藏的工业化开采方法。本书对煤层气藏和可燃冰气藏工业化生产具有一定的指导作用。

本书可作为高等院校石油工程、石油地质、煤炭工业、煤层气工程、油田化学专业研究生的教材或参考书；也可供油气田开发、石油地质、煤炭工业、煤层气工程、油田化学的工程师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

煤层气藏工程/冯文光编著. —北京:科学出版社,2009

(科学版研究生教学丛书)

ISBN 978-7-03-023543-5

I. 煤… II. 冯… III. 煤层-气藏-研究生-教材 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 189223 号

---

责任编辑:郭 森 刘希胜 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:张克忠 / 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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 6 月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—2 000 字数:340 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

煤层气俗称煤层瓦斯气,以游离自由态、溶解态和吸附态三种状态赋存于煤层,现今主要以吸附态吸附在煤的微孔隙壁表面上。煤成气俗称常规天然气(游离气),由过量的游离自由态煤层气运移到煤层以外的其他储集层中富集成藏。煤层气与煤成气是完全不同的:①储气机理不同。煤层气以吸附态吸附在煤的微孔隙壁表面上;煤成气以游离态储集在其他岩石的孔隙中。②产气机理不同。煤层气的产气机理是排水降压,当地层压力下降到解吸压力以下后形成解吸压降漏斗,在解吸压降漏斗内解吸→扩散→渗流→产气,煤层气几乎是在一个大气压力或以下生产的,因此只有解吸以后才能产气;煤成气一开井就形成生产压差,只要生产压差大于启动压差就可以产气,因此煤成气不解吸就可以生产。③储集岩石物性不同。煤层气储集在煤系岩石的微孔隙壁上;煤成气储集在煤系岩石以外的沉积岩石的孔隙中。④开采的流体性质不同。煤层气是在低温低压条件下开采;浅层的煤成气也是在低温低压条件下开采,其压力和温度都比煤层气高,而深层的煤成气则是在高温高压(如大于 $150^{\circ}\text{C}$ ,大于 $50\text{MPa}$ )条件下开采。⑤驱替机理不同。煤层气的驱替机理是气驱水;煤成气的驱替机理是水驱气。

煤成气开采是按油气藏工程的理论进行的;煤层气开采则不同。煤层气只有通过相变才能开采,必须首先将吸附态的煤层气变为游离态的煤层气才能开采。一部分油气藏工程的理论和方法可借鉴、促进形成煤层气工程理论和方法,但不能简单替代。困难的是,熟悉油气藏工程开采的人往往按油气藏工程的原理和方法(如布井和开发方案等)来处理煤层气的开采。

煤层气藏工程是一门待创建的崭新的学科。煤层气是一种洁净的新能源,其储量与天然气储量相当。煤层气开采既增加能源的种类和数量,又提高煤矿开采的安全性。对这门新学科应该重点研究解吸压降漏斗的形成、演化,以提高体积解吸速度和提高产能为宗旨,创建煤层气藏工程的新原理和新方法。我国目前煤层气的开采情况很不乐观,悲观论调占上风。关键在于,很多人仍然将常规天然气的勘探、布井、开采、开发方法照搬到煤层气藏的勘探、布井、开采、开发中,致使煤层气井产气量低、递减快。因此,创建煤层气藏工程这门新学科的新原理和新方法,尤为迫切。油气藏工程的观念根深蒂固,专业观念的转变需要时间,需要经过反复实践。本书全面总结煤层气的生成、储集机理,煤的物性、吸附性、电性及水文特征,提出采收率曲线。对注水、注水关井、产水、产水关井、产气、产气关井的试井进行全面论证,提出考虑污染的类型麦金利图版,还论述垂直裂缝、水平裂缝、多流

量试井。建立煤层气藏真三维模拟的数学模型、差分模型,提出三维最佳变松弛法、三维最佳对称变松弛法,提出泄流半径、解吸半径和解吸压降漏斗演变假说;提出提高解吸速度、提高整体产量和低产因素分析的方法。根据解吸压降漏斗演变假说和模拟结果证明:煤层气藏的最佳开发方案的关键是井网部署。本书最后还简述了可燃冰的工业化开采机理和工业化开采新技术。

只要采用等边三角形短井距多井、多层群井集采整体提高解吸速度,坚持排水排砂同时集排降压解吸技术,采用定向羽状分支水平钻井技术提高压降速度,采用空气钻井提高钻完井速度(同时可节约钻完井成本和降低钻完井对储层的污染),采用黏弹性无润湿清洁压裂液 VCF 水力压裂造细长高传导裂缝技术,采用 CNG、ANG 技术开拓零星分散而广阔的煤层气销售市场,轰轰烈烈的煤层气开采热潮将会席卷全国,我国实现年产 500 亿  $\text{m}^3$  以上的煤层气生产目标指日可待!

作者 1990 年参加煤层气“八五”国家攻关课题的研究,于 1993 年完成本书初稿,于 2008 年对本书进行修改,并增添可燃冰一章。

周瑞立参与编写 6.1 节和 6.2 节,姚昌宇、曹杰、吕新东、陈万钢、田禾茂、胡艾国、李俊参与校稿。杨宇全面校稿。

由于作者的水平有限,书中有不妥之处,敬请读者指正,不胜感激。

冯文光

2008 年 9 月 28 日

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 煤层气藏静态储层评价</b> .....	1
1.1 煤层气静态储层评价的基本理论与方法 .....	3
1.2 煤层气的生气、储气机理.....	3
1.3 煤的物理性质 .....	9
1.4 煤层地球物理测井.....	35
1.5 煤层水水文特征.....	56
1.6 煤层气藏的区域地质特征.....	60
<b>第 2 章 煤层气藏动态储层评价</b> .....	66
2.1 煤层气的产出机理.....	68
2.2 产量预测.....	70
2.3 低产因素分析.....	72
2.4 提高煤层气井产能的方法.....	74
<b>第 3 章 煤层气藏数值模拟</b> .....	84
3.1 煤层气藏开采机理.....	84
3.2 煤层气藏研究早期的数学模型.....	87
3.3 煤层气藏解吸产气的数学模型.....	99
3.4 最佳求解方法 .....	101
3.5 煤层气解吸的物质平衡方程 .....	103
<b>第 4 章 煤层气藏试井分析</b> .....	105
4.1 单一介质注水试井分析 .....	107
4.2 双重介质注水试井分析 .....	115
4.3 单一介质注水关井恢复过程的试井分析 .....	123
4.4 双重介质注水关井恢复过程的试井分析 .....	126
4.5 单一介质排水过程的试井分析 .....	128
4.6 双重介质排水试井分析 .....	134
4.7 单一介质排水关井恢复过程的试井分析 .....	141
4.8 双重介质排水关井恢复过程的试井分析 .....	144
4.9 单一介质煤层气产气试井分析 .....	146
4.10 双重介质煤层气产气过程试井分析.....	153

---

4.11	单一介质煤层气产气关井恢复过程的试井分析·····	160
4.12	双重介质煤层气产气关井恢复过程的试井分析·····	162
4.13	压裂裂缝试井·····	164
4.14	多流量试井·····	175
4.15	煤层气藏试井分析实例·····	178
<b>第5章</b>	<b>煤层气藏工业化开采·····</b>	<b>200</b>
5.1	煤层气藏开发方案的关键是提高解吸速度·····	200
5.2	排水采气提高解吸速度·····	201
5.3	解吸压降漏斗演变假说·····	205
5.4	煤层气藏的最佳井网·····	208
5.5	最佳井距·····	211
5.6	煤层气藏工业化开采的关键·····	213
<b>第6章</b>	<b>可燃冰的工业化开采·····</b>	<b>250</b>
6.1	天然气水合物及分布·····	251
6.2	天然气水合物的形成条件与机制·····	254
6.3	可燃冰气藏开采·····	256
6.4	采用CNG、ANG技术销售可燃冰·····	263
	<b>符号说明·····</b>	<b>264</b>
	<b>主要参考文献·····</b>	<b>266</b>

## 第 1 章 煤层气藏静态储层评价

从 20 世纪 80 年代以来,美国为了发展煤层气产业,进行了大规模的科研和试验,取得了总体勘探开发技术的突破。1984 年,美国国会通过煤层气享受税款补贴政策,使煤层气的收益超过天然气,具有一定竞争能力。例如,第一次海湾战争时,实行 1990 年底以前所有煤层气井不完税;第二次海湾战争,1992 年底以前所有煤层气井再次不完税;同时生产煤层气还给予补贴。在这项政策的推动下,美国煤层气产量从 1987 年的 8.7 亿  $\text{m}^3$ ,到 1996 年猛增 30 余倍,达到 295 亿  $\text{m}^3$ ,约是我国同年天然气产量的 1.7 倍。2004 年至今,美国年产煤层气 500 亿  $\text{m}^3$ 。

1990 年苏联在 48 座煤矿中采出煤层气达到 2.16 亿  $\text{m}^3$ 。在库兹巴斯,采用瓦斯抽放方法开采高瓦斯煤层。为了确保采矿安全,煤层瓦斯抽放效率不高于 20%,用于开拓工作的不高于 12%。开采煤层瓦斯抽放效果差,主要是因为瓦斯排放井数量不足、使用周期短,而且大多数情况下,煤渗透性低。作为额定效率为 60%~80%的新的瓦斯抽放技术,通过地面井从各煤层中收集煤层气,已在煤层气开采中采用。伯朝拉煤田 1984 年在平均瓦斯抽放效率为 51%时,煤层气回收量最高达到 2.9 亿  $\text{m}^3$ 。近些年来,年产煤层气大约 2 亿  $\text{m}^3$ 。

乌克兰于 20 世纪 50 年代初开始进行煤层瓦斯排放。1985 年,116 座煤矿装备了瓦斯抽放设备,每年能回收 5.91 亿  $\text{m}^3$  的煤矿瓦斯。在顿涅茨克煤田,每年回收大约 2.2 亿  $\text{m}^3$  的煤层气。在珠兹诺顿巴斯卡亚矿开发之前,钻进了试采煤层气的压裂模拟井。在扎苏亚卡煤矿(顿涅茨克煤矿)打了一口瓦斯抽排井,采用直径 100mm 的瓦斯管道向容量 350 万  $\text{m}^3$  的瓦斯存储站供应瓦斯,该站每天可供应 150~200 辆卡车的燃料。该充气站将三台压缩机、监测和瓦斯干燥系统结合在一起。

开发煤层气这一新型能源,有利于人类生存环境的保护,有利于解决煤炭开采中的安全问题,同时也有利于解决实施可持续发展战略过程中的能源不足问题,所以,引起了包括我国在内的世界各国的关注。虽然我国是一个能源大国,但是能源结构不尽合理,人均能源占有量低。因此,有计划地开发、利用煤层气资源,对加速我国四个现代化建设,满足国民经济发展对能源的需求,具有重要的战略和现实意义。

(1) 变害为利,保障煤矿的安全生产,提高煤炭生产的经济效益。煤层气是巨大、洁净、高燃烧值、有利于环保的吸附态新能源。我国频频发生瓦斯爆炸,既造成



严重的人员伤亡、财产损失,又造成大量的能源浪费。

煤层气爆炸连续频繁发生,造成很多物力、财力、人力重大损失。我国国有重点煤矿中高瓦斯矿井占 47%,新中国成立以来已发生瓦斯事故 1500 余起。仅 1983~1994 年,国有重点煤矿发生瓦斯与煤尘爆炸重大事故就有 675 起,造成严重的人身伤亡,直接经济损失高达 150 多亿元(不包括乡镇煤矿瓦斯爆炸事故所造成的人员伤亡和经济损失)。有计划地进行煤层气的开采,可以大幅度降低煤层的瓦斯含量,从根本上解决或减少瓦斯事故,从而保障安全生产,变害为利,降低煤炭的开采成本,提高煤炭工业的经济效益。

(2) 开发煤层气,有利于改善能源结构,促进国民经济的发展。我国的能源结构与世界发达国家相比极为不合理,煤炭占的比例大,石油仅为世界平均水平的 1/3,天然气为 1/10。地球上,人类赖以生存、发展的资源是十分有限的,且具有不可再生性。煤层气储存于煤层之中,伴随着煤炭的开采而扩散,不但造成重大的灾害,同时也造成了自然资源的严重浪费。因此,煤层气的开发,对改善我国天然气人均占有量偏低的现状、发展新型能源产业和改善国民经济能源结构具有重大的现实意义。特别是煤层气开发涉及国家基础设施建设、煤炭、化工、电力、交通、冶金、机械、高新技术等领域,势必带动相关产业的发展,加速落后地区城市化的进程,创造更多的就业机会。因此,煤层气的开发利用可以成为我国 20 世纪末的一个新的经济增长点。

(3) 减少大气污染,保护人类的生存环境。地球的生态环境是人类生存、发展的基本条件,生态环境的破坏,直接威胁着人类的生存。众所周知,在诸多生态环境破坏的因素中,以大气层污染及其对气候的影响、对地球生态的破坏尤为突出。甲烷的温室效应大约是二氧化碳的 20 倍以上。据粗略估计,我国煤矿每年向大气排放的煤层气甲烷约为 60 亿  $\text{m}^3$ ,约占世界采煤排放甲烷量的 1/3,既浪费能源,又对环境造成了巨大的破坏。因此,加快开发利用煤层气,减少甲烷向大气的排放量,不但可以有效地利用资源,也将有效地保护人类生存的环境。

(4) 我国煤层气资源丰富、分布广。根据“七五”国家重点科技攻关项目中,专题的计算结果,1000m 以浅范围内我国煤层甲烷的资源量为 14.3369 万亿  $\text{m}^3$ ,四川为 4712.8 亿  $\text{m}^3$ 。2000m 以浅范围内我国煤层气资源量为 35 万亿  $\text{m}^3$ 。我国煤层气资源分布在不同的含煤盆地、不同的成煤时代、不同煤阶的储层之中,其埋深、勘探难度等各不相同。

我国将煤层气作为一种独立的新能源进行勘探与开发始于 20 世纪 80 年代中期。

1989 年 12 月,能源部在沈阳召开了第一届“全国开发煤层气研讨会”,掀起了全国地面勘探开发煤层气的热潮。随后,有关部门和地方政府积极融资或引进外资,开展煤层气勘探开发试验,分别在开滦、晋城、淮南、阜新、淮北、平顶

山、焦作、鹤壁、安阳、荥阳、大城、沁水、丰城、冷水江、红阳、沈北等地区打勘查井,进行评价或开发试验,至1995年共钻井94口。其中主要的成果是:在晋城高阶煤中成功地进行了排采试验,单井稳产为 $2000\sim 3000\text{m}^3/\text{d}$ ;在山西柳林地区成功地进行了7口煤层气井网的试验,单井最高口产量为 $7000\text{m}^3/\text{d}$ ,平均单井产量约为 $2000\text{m}^3/\text{d}$ ,这些工作为在我国进行煤层气勘探开发开辟了道路。但由于没有统一规划,一哄而起,简单重复,到1995年始终没有形成一个可供开发的生产基地。

## 1.1 煤层气静态储层评价的基本理论与方法

静态地质特征主要从煤层气的储集性,如煤的物性、岩性、电性、含气量等方面进行研究。煤的物性研究主要包括煤的孔隙度、孔隙结构几何学、孔隙大小分布。煤的岩性主要指煤阶。煤的电性主要由测井资料进行研究,同时还应该进行煤的割理孔隙度、割理渗透率、含水饱和度等研究。煤的含气量研究包括含气量与煤阶的关系、与深度的关系,吸附能力与煤阶的关系、与煤的组分、静水压力、岩石静压力等的关系。煤的吸附等温曲线是煤吸附甲烷的特征曲线,表达了吸附量、解吸量与压力的关系。渗透率与构造曲率、原地应力等的关系,可说明流通性。地下水的研究,通过水位要素(压力状态、水力压头、水化学)可以识别超压区、低压区、渗透性好的区域与边界等。

这些研究为煤层气资源量研究奠定了基础。同时为井位确定提供充分的依据。

井位确定的主要依据:

(1) 含量高,高阶煤含气量高,镜质体反射率 $R^0$ 大于0.7%。

(2) 渗透性好,即透气系数高。具有高渗透的条件:①埋深小于1500m。②煤密度小于 $1.69\text{g}/\text{cm}^3$ ,割理发育。③曲率大,裂缝、断裂发育。④最大主应力与最小主应力之比称为水平应力比,水平应力比高于2.0,即最小主应力大于上覆压力,将产生垂直裂缝;水平应力比低,约为1.4,将产生水平裂缝。⑤解吸压力与地层压力之比趋于1,超压区的最高产量井位于水向上流或水力坡降平缓地区;低压区的高产井位于区域排水区。

## 1.2 煤层气的生气、储气机理

### 1.2.1 煤化作用与煤层天然气的生成

由于埋深、时间和温度等条件,陆源植物组织的堆积在物理和化学作用下演化

成熟成熟的煤,如图 1.1 所示。

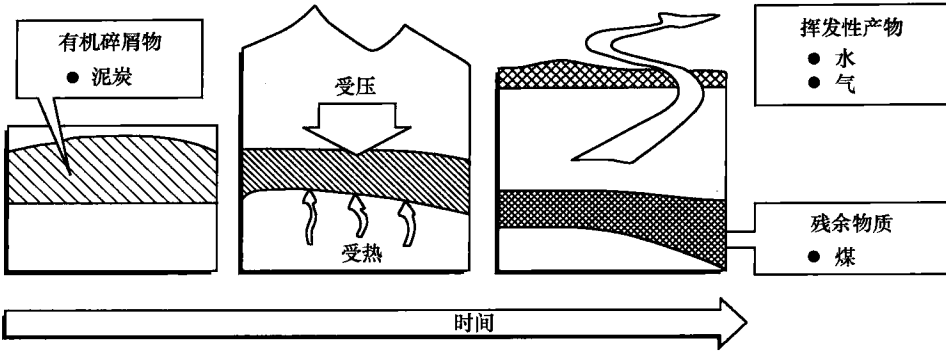


图 1.1 煤化作用  
(华北石油地质局,1990)

有机碎屑物形成的泥炭在沉积过程中逐渐埋深,压力、温度增加,压实增强、温度提高,经物理、化学作用产生挥发性产物,水和气、大部分游离气被逸散,一部分游离气体被吸附在煤的微孔隙壁上,一部分气体溶解于水中。煤化过程中要经过煤化旋回:泥炭→褐煤→亚烟煤→烟煤→无烟煤→石墨。

在压实与受热的作用下,有机质转化为煤素质。煤素质是煤的显微组分。煤素质主要有三种:镜质组煤素质、壳质组煤素质、惰质组煤素质。镜质组煤素质代表胶质细胞壁或木质原料。壳质组煤素质代表植物树脂(角质层和孢子)。惰质组煤素质代表炭化木质原料。

用镜质组煤素质可以最准确地测定煤化过程的成熟度或煤阶。镜质体光学反射率  $R^{\circ}$  的百分比随煤阶的增高而增加。Lopatin 认为,温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,煤化作用的反应速度快一倍。他提出按  $10^{\circ}\text{C}$  的温度间隔划分地质时间阶段,把时间和温度联系起来,计算时间温度指数

$$TTI = \sum_i^n T_i G_i \tag{1.1}$$

式中:  $T_i$  为  $i$  时间段的温度校正系数;  $G_i$  为  $i$  时间段的地质加热时间。

镜质体反射率  $R^{\circ}$  和时间温度指数 TTI 的关系为

$$R^{\circ} \% = 1.301 \lg TTI - 0.5282 \tag{1.2}$$

表 1.1 列举了以镜质体反射率  $R^{\circ}$  表示的煤阶增加所需的温度。

表 1.1 煤的演化(华北石油地质局,1990)

R <sup>o</sup> /%	温度/°F	煤阶	热成甲烷 (/10 亿 ft <sup>3</sup> /mi <sup>2</sup> )	水/(100 万桶 /mi <sup>2</sup> )	厚度/ft	沉积后作用阶段
		早期泥炭	—	42.0	7.0	成岩作用
0.23	95	泥炭	—	14.0	3.5	
0.36	122	褐煤	—	6.8	2.4	
0.43		亚烟煤-C	—	3.6	1.8	
0.47		亚烟煤-B	—	2.3	1.4	
0.51	158	亚烟煤-A	—	1.6	1.4	
0.76	196	高挥发分烟煤-B	—	0.58	1.2	
0.90		高挥发分烟煤-A	0.37	0.50	1.2	深成热解作用
1.11	248	高挥发分烟煤-A	2.14			
1.30		中挥发分烟煤	2.16	0.45	1.0	
1.50	302	中挥发分烟煤	0.47			
2.04	356	低挥发分烟煤	0.49	0.34	1.0	
2.7	392	半无烟煤	—	0.25	1.0	深变作用
		合计	5.63	72.42		

注:1ft=3.048×10<sup>-1</sup>m;1ft<sup>3</sup>=2.831685×10<sup>-2</sup>m<sup>3</sup>;1mi<sup>2</sup>=2.589988km<sup>2</sup>。

有机质在煤化作用过程中受到系统的化学和生物降解,产生不同数量的水和气。要了解现在煤储层水和气的聚集,就必须研究这些化学产物。

煤成熟过程有两个最重要的阶段,即成岩作用阶段和深成热解作用阶段。这两个最重要的煤成熟阶段是根据生物和热演化的产物确定的。水、生物成因的甲烷、二氧化碳是煤的主要成岩产物。水来源于沉积体系和有机质的分解。

成岩作用阶段,镜质体光学反射率 R<sup>o</sup> 为 0.23%~0.7%,该阶段生成的水占有生物气和煤层水的 98%。在压力和温度继续作用下,煤进入深成热解作用阶段。镜质体反射率从 0.73%开始进入深成热解作用阶段。镜质体反射率 0.73%~0.90%是深成热解作用的开始生气阶段,0.9%~1.3%是深成热解作用的生气加速阶段,1.3%~2.0%是深成热解作用的生气缓慢阶段,从 2.0%开始进入深成热解作用的生气停滞阶段,如图 1.2、图 1.3 和图 1.4 所示。对于深成热解作用阶段,不同的学者分段不一样,差异在于各阶段的镜质体反射率终止限不一样。但有两点相同:①都认为深成热解作用从镜质体反射率 0.73%开始;②都认为深成热解作用阶段可分为开始生气、生气加速、生气缓慢、生气停滞四个分阶段。

从上面分析可知,煤层中水和热成甲烷的生成是沉积时间和煤成熟度的函数,如图 1.5 所示。煤化过程中生成天然气的数量如图 1.6 所示。

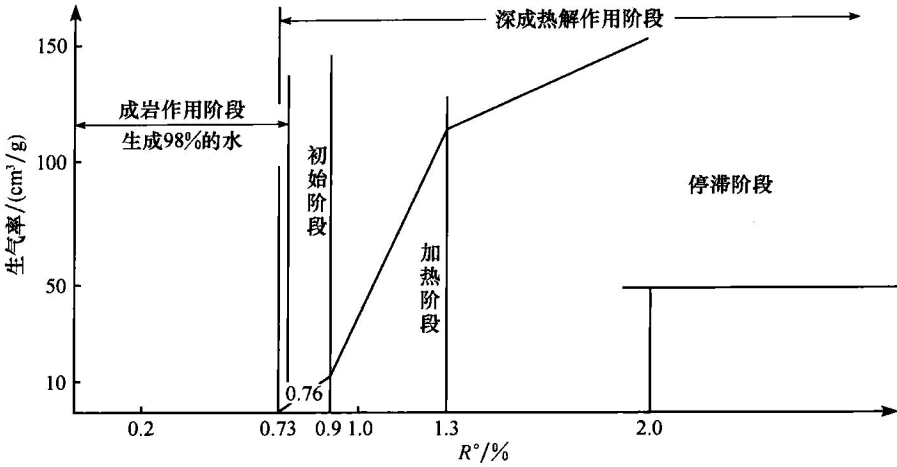


图 1.2 煤化过程甲烷的生成  
(华北石油地质局, 1990)

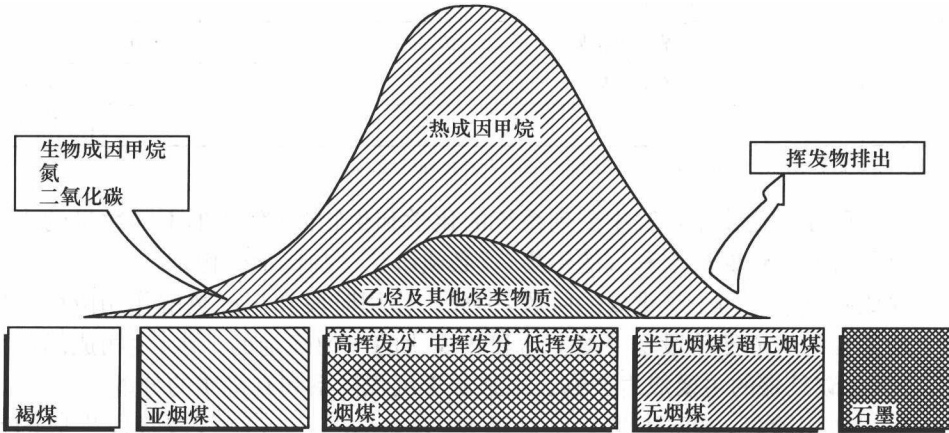


图 1.3 煤化过程  
(华北石油地质局, 1990)

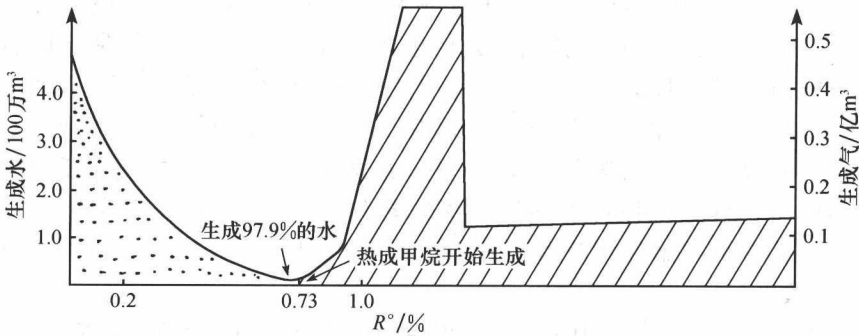


图 1.4 煤化过程中水和甲烷的生成  
(华北石油地质局, 1990)

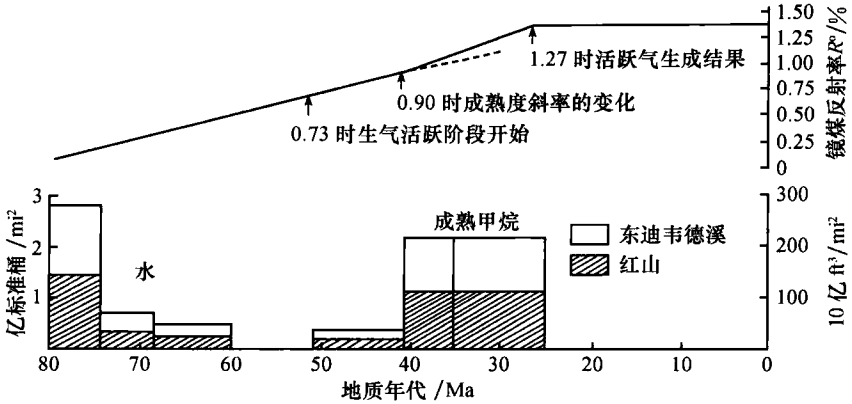


图 1.5 煤化过程生成水和甲烷的数量是地质年代与煤阶的函数  
(华北石油地质局, 1990)

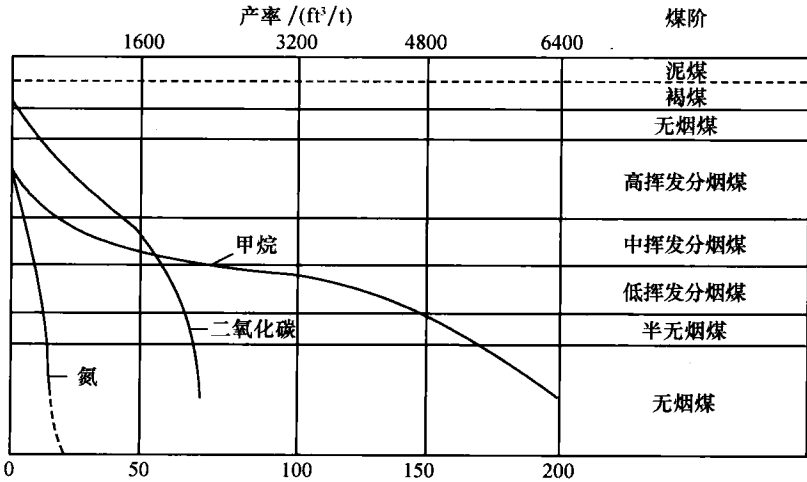


图 1.6 煤化过程生成天然气的数量  
(华北石油地质局, 1990)

煤化过程就是成煤作用过程，一方面是煤的储集过程，另一方面也是煤层天然气的生成与储集过程。煤层气的生成与煤阶的关系可参见图 1.7。

煤受的温度越高，时间越长，煤阶就越高，生成的甲烷气量就越大。

### 1.2.2 煤层中天然气的储集机理

在煤化作用、局部构造应力作用下，煤内产生的裂缝称为割理。煤的基岩块内还发育有孔洞、孔隙，煤的基岩孔隙可分为大孔、中孔和微孔，其中孔隙喉道小于  $12\text{\AA}$ <sup>①</sup> 的微孔所占比例最大。关于煤的孔隙结构后面将详述。

①  $1\text{\AA}=0.1\text{nm}=10^{-10}\text{m}$ 。

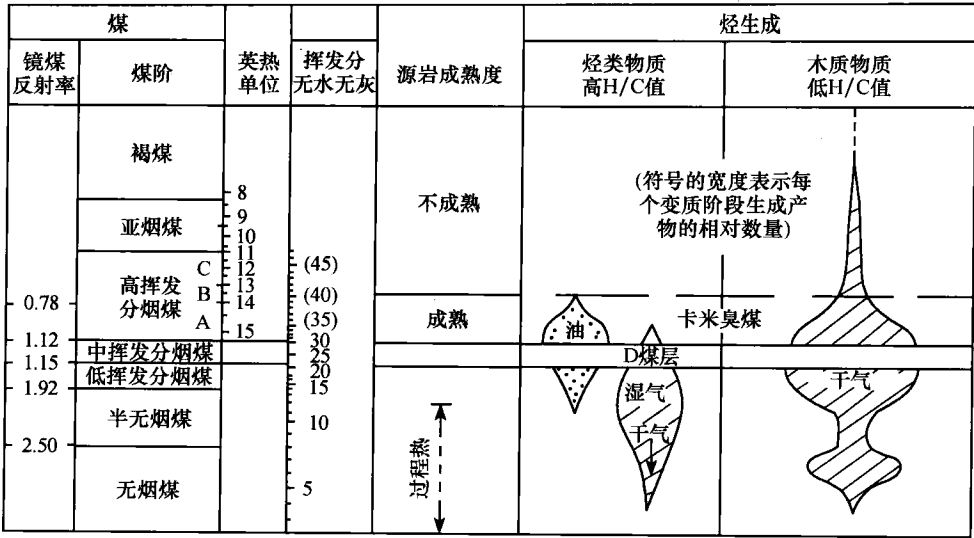


图 1.7 煤化过程中水和甲烷的生成与煤阶的关系  
(华北石油地质局,1990)

煤层中天然气以游离状态、吸附状态和溶解状态赋存于煤层中。游离天然气以自由气体状态储集在煤的割理和其他裂缝孔隙中,在压力的作用下自由运动。这种游离状态的天然气与常规天然气储集状态一样,可用常规天然气的研究方法进行研究。但这种游离态的煤层气在煤层中只占煤层气的 10%~20%。溶解在煤层水中的天然气称为溶解气,数量较少。吸附状态发生在煤的内表面上,分子的吸引力一部分指向煤的内部,已达到饱和;而另一部分则指向空间,没有饱和,在煤的孔壁表面产生吸附场,吸附周围的气体。这种吸附是物理吸附。煤是吸附剂,天然气是吸附质。

在吸附剂表面上,由于分子力的不对称作用而存在的一种过剩的自由能,而物质总是力图缩小其表面自由能,即表面张力。这种缩小的趋势可以通过吸附与其相邻的吸附质分子,减少表面积,减少自身的表面自由能,这就是吸附。吸附现象发生于两相界面,随着界面面积的增加,吸附作用也随之增加。煤的微孔隙表面积相当大,煤的内表面积可高达 100~2400m<sup>2</sup>/g。天然气在煤的微孔隙壁上的吸附以多层吸附为主,吸附厚度可达 0.2μm 以上。吸附前,吸附质的分子具有三个自由度,即可在空间三维上向任何方向移动。吸附后,吸附质的分子只有二个自由度,即吸附质的分子只沿吸附剂的表面移动。

物理吸附具有 100% 的还原性,这个过程称为解吸,即在一定条件下,吸附质的分子脱离吸附剂的表面,成为自由状态。

物理吸附的特点是吸附质的分子保持其个性,并吸附在吸附剂的表面保持范

德华力。吸附质分子落到吸附剂的表面上,并在其上保持一定的时间力场,然后解吸。当吸附速度大于解吸速度时,继续吸附,直到吸附速度等于解吸速度时达到吸附平衡,吸附质分子在吸附剂表面上形成吸附层。

吸附质是任何气体时,在相当低的条件下都能在任何吸附剂表面上吸附。因此,天然气在煤的孔隙壁面上吸附条件很低、吸附速度很快,几乎是瞬息发生。假若吸附质不被次生过程造成复杂化,如吸附质分子向吸附剂表面慢慢扩散或慢慢渗透过吸附剂孔隙,吸附质的分子一接近吸附剂表面就发生吸附。当然,解吸过程也是在固气界面上发生,天然气通过微孔隙扩散,天然气分子本身首先和孔隙壁表面分离。解吸的速度有人称为吸附时间(单位:天)。吸附时间越少,解吸速度越快。煤中孔隙大小分布的控制因素是压力、温度和水分,因此吸附速度、解吸速度的控制因素也是压力、温度和时间。一般说来,压力越大,吸附量越多,压力上升快,吸附速度快;反之,压力下降快,解吸速度也快。埋深造成的地层高压使煤的吸附作用达到最大。温度越低,吸附量越大;温度下降速度越快,吸附速度也越快。煤层水越多,天然气被吸附的量就越少。因为煤的孔隙壁表面积与煤的粒度有关,因此吸附量也与煤的粒度有关。颗粒越小,粒度目数越多,孔壁表面积越大,吸附量越大。

煤的孔隙分为大、中、微孔隙。大孔隙的直径大于 $500\text{\AA}$ ,中孔隙的直径为 $20\sim 500\text{\AA}$ ,微孔隙的直径小于 $20\text{\AA}$ 。大孔隙是解吸过程中的渗流通道。孔隙容积主要与中孔隙有关,中孔隙是解吸过程的容积。孔隙表面积主要与微孔隙有关,因此煤层甲烷主要储集机理是吸附在微孔隙壁表面上。

煤的吸附能力受煤素质、煤阶、孔隙结构、水分、灰分、温度、压力等制约。常规天然气的储集与煤层天然气的储集具有本质的区别。常规天然气的储集依赖于储层的圈闭条件,煤层天然气的储集依赖于煤层微孔隙壁面的吸附作用。

常规天然气的储量计算与煤层天然气的储量计算也有本质的区别。为了便于比较,都以相同的储层厚度和面积说明它们的本质区别。常规天然气的储量计算依赖于孔隙度和束缚水饱和度,而煤层天然气的储量计算与孔隙度无关,与束缚水饱和度的关系也不大,主要依赖于吸附定律。

后面我们还会说明常规天然气的开采机理与煤层天然气开采机理的本质区别。

### 1.3 煤的物理性质

煤层既是煤层甲烷的源岩,也是煤层甲烷的储层。因此,研究煤的物理性质尤为重要。煤层气的产量三要素是:①稳定煤层的厚度大,面积大;②煤层气含量高;③煤层渗透率高。控制三要素与煤的各种物理性质相关。

#### 1.3.1 煤的孔隙结构

煤的孔隙结构与常规天然气储层的孔隙结构不一样。从前面的分析可知,常



规天然气是以游离态储集在储层的孔隙中，而煤层气则多以吸附态储集在煤的微小孔隙壁表面上。

常规天然气储层岩石的孔隙结构，有孔、洞、缝，这种孔、洞、缝的分布具有强烈的随机性。煤的孔隙结构也有孔、洞、缝，但裂缝的分布具有很强的规律性，具有一定的方向。煤的孔隙结构由基岩孔隙系统和裂缝孔隙系统组成。习惯上，将煤的裂缝称为割理，割理比较规则，将煤分割成许多比较规则的块状的基岩块体，如图 1.8 所示。

按割理的形成因素可将割理分为内生割理和外生割理。内生割理是煤化作用过程的结果形成的，外生割理是由构造力引起的。按割理的延伸长度和发育程度，将割理分为面割理和端割理。面割理与端割理相互垂直。延伸长度长，发育程度好的割理称为面割理，面割理是主要的割理。延伸长度短，发育程度差，垂直于面割理而被夹于两面割理之间的割理称为端割理，端割理是次要的割理，如图 1.9 所示。面割理的延伸长度可达几百米，端割理只发育于两条割理之间。两种割理和层理面正交或陡角相交。相邻两条割理之间的距离称为割理间距。割理间距可达几厘米到几十厘米。每厘米长的煤中的割理条数称为割理密度。

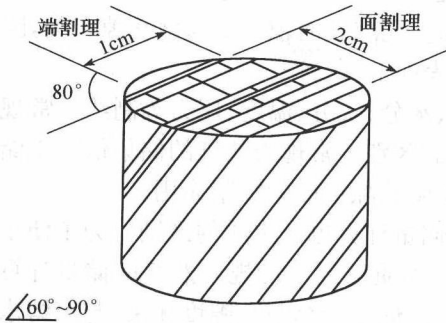


图 1.8 煤的割理系统

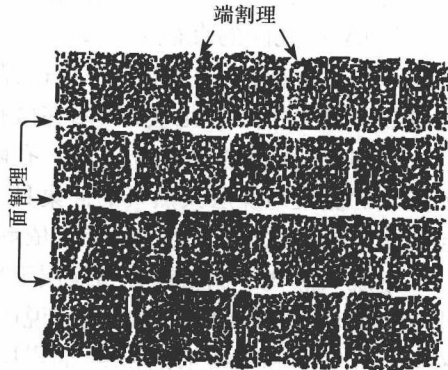


图 1.9 煤的孔隙结构

割理是煤的天然裂缝网络，每组割理大致与层面垂直，由相距 1~5mm 的平行裂缝组成。面割理基本上是连续的，通常垂直于水平应力。端割理不连续，发育于面割理之间，通常与水平应力平行。由于面割理比端割理发育得多，因此割理走向具有强烈的方向性，且具有强烈的非均质性。

割理的发育程度与煤阶关系特别密切。随着煤阶的增长，内生割理越发育。焦煤的内生割理密度大于 6，无烟煤的内生割理密度小于 2，长焰煤的内生割理密度小于 1。

割理的发育程度与煤的密度有关，低密度的煤有利于割理的生长，如图 1.10 所示。