

煤层气勘探与开发

杨申镛 徐春华 宋国奇 编著

*gas from
coal-bed*

石油大学出版社

PDG

前 言

在天宇高洁、微云欲散的月明之夜，遐想各种宇宙现象，无不惊叹自然界的雄伟、浩瀚。大自银河系、总星系，小至原子核、基本粒子，都遵循各自发展规律在不停地运动。地球科学的基本问题不能用直接观测的证据来解决，只能间接地予以预测和推论。因此，地球科学的发展是一个漫长的探索过程，而探索地下油气奥秘则是项复杂、艰难的事业。

在近十年油气勘探的实践中，地学又面临着“煤成烃”、“煤成气”等新领域的挑战。学科的边缘是萌发新科学的土壤，虽然煤层气地质尚处于初始或研究阶段，但作者确信，在人类开拓新的能源战斗中，这门学科将发挥越来越大的作用。“煤层气勘探与开发”一书，以“煤田地质与油气地质结合”和“国外煤层气实例与国内实践结合”出发，介绍了煤层气的化学组分，储存状态，煤层气的资源量计算和勘探与生产，及国内外煤层气勘探开发实例等，期望推动国内煤层气勘探与开采工作。

总之，煤田地质与油气地质紧密结合必将促进地球科学的发展。可以预料，在不久的将来会有许多关于煤层气方面的文献和专著问世，煤层气地质必将发展成一门新的学科。

煤层气勘探与开发在天然气领域中正显示出它的魅

力。我们希望本书能对我国的煤层气地质事业起到抛砖引玉的作用。

本书编写得到国家级有突出贡献的专家刘兴材教授的热情指导,胜利石油管理局地质科学研究所程本合参加了第三章、第四章、第五章第一节的编写工作,张肖兰参加了第六章第二节的编写工作。作者对他们表示诚挚的谢意。

作者

一九九四年八月

目 录

绪 论	(1)
第一章 煤层气化学组分	(3)
第一节 烃类气体	(3)
第二节 非烃类气体	(3)
第二章 煤层气的生成及储存状态	(5)
第一节 煤层气的生成	(5)
第二节 煤层气的储存状态	(8)
第三节 煤层气的产出特点	(15)
第三章 煤层气含量的控制因素	(17)
第四章 煤层气资源量计算	(22)
第一节 煤质分析	(22)
第二节 煤层地质条件分析	(24)
第三节 煤层含气量测定	(26)
第四节 煤层气储量及采收率	(37)
第五章 勘探与生产	(41)
第一节 地质综合研究	(41)
第二节 井位部署	(46)
第三节 钻探	(49)
第四节 间歇试井——测定渗透率	(50)
第五节 完井	(53)
第六节 水力压裂与地质条件	(56)
第七节 水的排放及排后处理	(57)
第八节 监测和试验	(58)

第九节 生产问题	(59)
第六章 世界主要含煤盆地及煤层气勘探开发概况 ..	(62)
第一节 世界含煤盆地概况	(62)
第二节 国外煤层气勘探概况	(65)
第七章 国外煤层气勘探开发实例	(78)
第一节 圣胡安盆地煤层气勘探与开发	(78)
第二节 皮申斯盆地煤层气勘探	(83)
第八章 中国煤层气研究实例	(88)
第一节 准噶尔盆地煤层气地质研究	(88)
第二节 山西晋城煤层气地质研究	(91)
参考文献	(94)
附录	(97)
表 I 煤的变质作用不同观点的比较	(97)
表 II 成煤植物和不同演化阶段镜质组化学成分	(98)
表 III 变质阶段的划分和命名	(98)
Smith-williams 法计算逸散气量实例	(99)

绪 论

煤层气(coalbed gas)是指在煤化作用过程中形成的,目前仍储集在地下煤层中的天然气。

煤层气主要成分为甲烷气,通常称为瓦斯。在18世纪以前,由于开采的煤层较浅,瓦斯含量较低,因而并未受到人们的重视。直到18世纪早期,随着开采技术的不断发展,煤层的开采深度不断增大,瓦斯爆炸成了煤矿开采的一大难题。于是人们开始了对煤层瓦斯的研究,但也仅仅局限于煤层脱气,以保证煤矿开采的安全。直到20世纪70年代,由于常规天然气资源逐渐减少和需求的不断增加,美国首先开始了煤层气资源的研究与开发。1975年,美国钢铁公司和美国矿业局首先在阿拉巴马州的Oak Grove煤矿进行了小规模煤层脱气试验,之后,许多研究机构又在黑勇士和圣胡安两含煤盆地开展了大规模的研究和试验,全面系统地研究了煤层气的形成机理、储集方式、控制因素、开发特点等。通过研究,加深了对煤层气资源的认识,并形成了一系列勘探开发煤层气的新技术,使美国的煤层气工业迅速发展,成为独立于煤炭工业之外的一门新兴能源工业。

我国是发现煤层中有天然气较早的国家。宋代鲁应龙记载:“嘉禾志:顾亭林庵中,有忠烈公祠,近岁忽地裂数尺,中有风涛声,以物探之,应手火起,至今尚然。”嘉禾可能就是现在的湖南省嘉禾县,王嘉阴教授认为它可能是煤层里放出的一些天然气。

我国煤炭资源比较丰富,张新民等人(1991)研究,我国的煤炭资源总储量约50Tt,其中探明储量7000多亿吨,居世界第三位。从煤层气勘探的现实分析:埋深小于1000m的煤炭资源占总量的

52.78%；1000~1500m 为 22.9%。即 75%以上的煤炭分布区都是煤层气勘探开发的有利地区。

从煤的变质程度分析：煤层气最有利的煤阶——含气量最大的中、高变质煤（肥煤——无烟煤）约占全国煤炭总量的三分之一，在低变质的煤阶中，情况不明的煤种亦约占三分之一，即我国 60%的煤炭都处于储存煤层气的有利煤阶，由此可见，我国煤层气资源潜力巨大。

我国的煤层气研究才刚刚起步，预计在不远的将来，在开拓煤层气新的能源中，我国的煤层气工业将会崛起和发展，进入一个全新的阶段。

第一章 煤层气化学组分

煤层气的化学组分有烃类气体(甲烷及其同系物)、非烃类气体(二氧化碳、氮气、氢气、一氧化碳、硫化氢以及稀有气体氦、氩等)。其中,甲烷、二氧化碳、氮气是煤层气的主要成分,尤以甲烷含量最高,二氧化碳和氮气含量较低,一氧化碳和稀有气体含量甚微。

第一节 烃类气体

煤层气的主要成分是甲烷,其含量一般大于 85%,其它烃类气体含量极少。通常,在同一煤阶,烃类气体随埋藏深度的增大而增加。重烃气主要分布于未受风化的煤层中,此外,重烃含量还与煤变质程度有关,中变质煤中重烃含量最高,而低、高变质煤中最低。

第二节 非烃类气体

大多数煤层气中的非烃类气体含量通常小于 30%,其中氮气约占三分之二,二氧化碳约占三分之一。如美国阿巴拉契亚盆地、阿科马盆地和黑勇士盆地,其煤层气中非烃气体含量极低,远远低于 10%(表 1-1)。在某些煤层气中,氮气和二氧化碳含量变化很大,如江西丰城煤矿,其氮气含量变化在 0.20~83.39%,二氧化碳含量变化在 0.02~10.12%(图 1-1)。氮气分子较小,运移速度快,因而主要受上覆盖层质量的影响。二氧化碳易溶于水,且易被

地下水带走,因而二氧化碳含量主要受地下水活动的影响。此外,氮气和二氧化碳含量也受煤层埋深的影响,一般越靠近地表,氮气和二氧化碳的含量越高。

表 1-1 煤层气化学组分 (引自程守田等, 1991)

含煤盆地	中阿巴拉契亚	北阿巴拉契亚	北阿巴拉契亚	阿尔科玛	黑勇士
煤层	Pocahontes no. 3	Pittsburgh	Kittanning	Lower Hartshorne	Marylee
CH ₄	96.87	90.75	97.32	99.22	96.05
C ₂ ⁺	1.40	0.29	0.01	0.01	0.01
O ₂	0.17	0.20	0.24	0.10	0.15
其它*	2.09	8.84	2.44	0.66	3.45
H ₂	0.01				

其它:指 N₂、CO₂ 和 He。

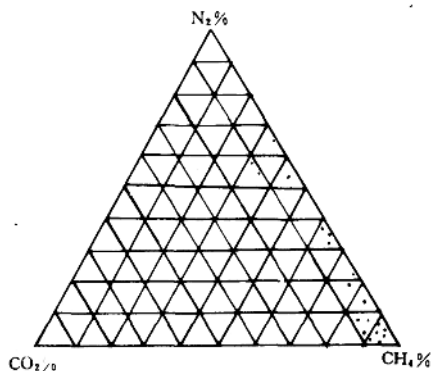


图 1-1 江西丰城矿区煤层气化学组分
(据西安煤科院, 1988)

此外,煤层气中一般还含有少量的氢气。

第二章 煤层气的生成及储存状态

第一节 煤层气的生成

成煤物质在从泥炭向高变质煤的演化过程中,随着有机质的不断埋深,温度逐渐升高,将伴生大量的气体,它包括:成岩作用早期受厌氧细菌降解而生成的生物降解气和热解作用形成的干气。因此,按照成因机理,煤层气可划分为生物降解型和热解型两类。

一、生物降解煤层气

在泥炭化作用和煤化作用的早期阶段,微生物对植物残体不断分解,所生成的气体称为生物降解气,这一过程的温度一般在50℃以下,相当于泥炭—褐煤阶段。由于生物气常常形成于地表或地下浅处,因而生成的气体极易扩散到大气中,仅有少量气体聚集在煤层附近,储于由差异压实所形成的同沉积背斜的砂岩透镜体中或由泥页岩所包围的煤层内。

生物降解型煤层气的生成量:每吨可燃基褐煤生成的生物甲烷为38m³。该类气体的生成量约占200℃以下煤层气总生成量的10%(Rightmire 1984)。

二、热解型煤层气

随着埋藏深度的增加,温度的上升,煤的变质程度不断提高,生成了大量的甲烷和其他气体。这一变质过程导致了有机质不断脱氧、脱氢、富碳。

生成的气体类型取决于煤的变质程度。Meissner(1984)认为：当 R_o 大于 0.73%、可燃基挥发份含量大于 37.8% 时，热解型煤层气开始大量生成。B. E. Law(1985)则认为热解型煤层气开始大量生成时的温度为 88~93℃ $R_o=0.80\%$ (R_o 为镜质体反射率)；C. T. Rightmire(1984)认为：当 R_o 为 0.60%，挥发份为 40.24%，即相当于高挥发份烟煤 C 时，热解型煤层气开始生成，其生成高峰在 150℃ 左右，相当于高挥发性烟煤 C 和低挥发份烟煤交界处。

据 Hunt 等(1979)研究：在煤化学作用早期 (<120℃)，生成的气体以二氧化碳为主，在高挥发份烟煤与低挥发份烟煤分界处所生成的二氧化碳是甲烷的两倍多(图 2-1)。在该点之后，甲烷气

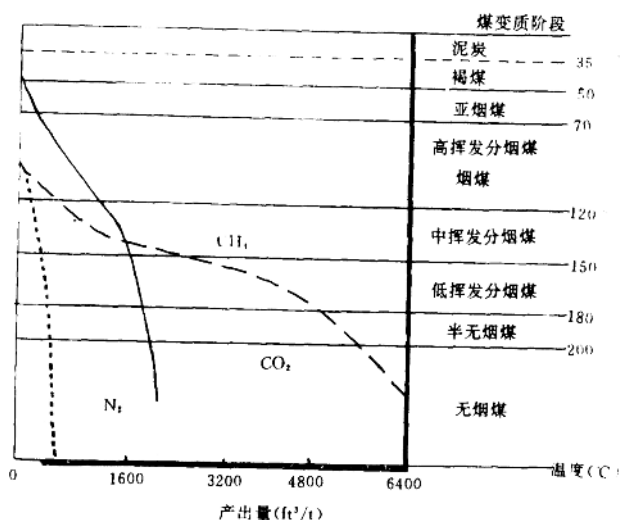


图 2-1 煤化作用中的生成量
(据 Hunt, 1979)

的生成量迅速增加,产气高峰在中挥发份烟煤与低挥发份烟煤的分界处(相当于 150℃)。此时,镜质体的反射率达到 1.8%左右,生成的气量约占从褐煤至无烟煤总生气量的 70%。之后继续生气,至无烟煤 2 号,镜质体反射率超过 4.0%,逐步停止生气过程。氮气首先以氨的形式在高挥发份“A”烟煤(即 120℃)阶段释放出来,之后被氧化成氮。

F. F. Messner(1984)研究认为:随着煤变质作用的加强,甲烷的生成量与可燃基挥发份的减少呈指数函数关系,其数学表达式为:

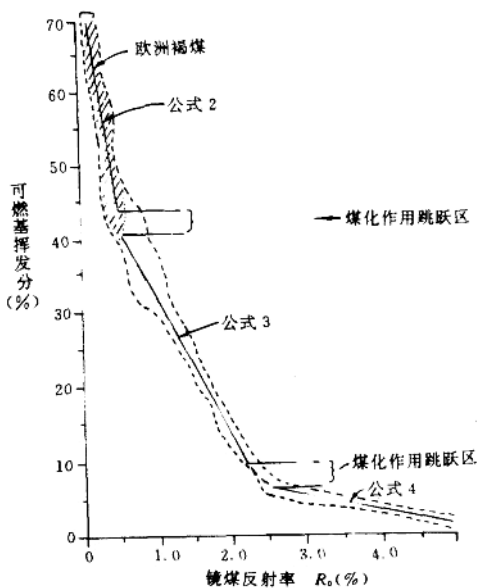


图 2-2 挥发份和镜质体反射率的关系
(转引自程守田等,1991)

$$V_{c_1} = -325.6 \lg \frac{V_m \%}{37.8}$$

式中 V_{c_1} ——甲烷生成量(cm^3/g 可燃基煤)

V_m ——可燃基挥发份百分含量。

由上式可知,当挥发份从 37.8% 减少到 5%,即从高挥发份烟煤“*A*”变化到无烟煤时,每吨可燃基煤可生成 259m^3 的甲烷。

挥发份和镜质体反射率之间存在着线性关系,它由三个直线段和两个“煤化作用跳跃区”构成(图 2-2),三条直线段的数学表达式为:

$$V_m \% = 83.11 - 77.14R_0 \quad (0.17 < R_0 < 0.52)$$

$$V_m \% = 51.2 - 18.26R_0 \quad (0.56 < R_0 < 2.30)$$

$$V_m \% = 11.67 - 1.93R_0 \quad (2.57 < R_0 < 5.00)$$

因此,利用镜质体反射率也可计算热解型煤层气的生成量。

第二节 煤层气的储存状态

煤层气主要以三种形式储存在煤层中:即吸附状态、游离状态和水溶状态。分别称之为吸附气、游离气和水溶气。

一、吸附气

吸附气是指以吸附状态保存于有机质颗粒表面的气体。吸附气在有机质颗粒表面形成由多层分子组成的凝缩弹性气体膜。这种气体膜的厚度取决于煤颗粒表面活性以及气体分子内部的彼此排斥力。煤具有较强的吸附能力,Mahajan(1982)认为典型的吸附于煤颗粒表面的气体分子相当于其比表面积的 2~3 倍。

吸附气含量受诸多因素的影响,概括起来有以下几个方面:

1. 煤的孔隙大小和形态

形成吸附气的有效半径为 $15 \sim 100 \text{ \AA}$,当煤的孔隙小于或接

近于气体分子直径时,不形成吸附气。

2. 煤的变质程度

煤的吸附气含量一般随变质程度的提高而增加(表 2-1)。

表 2-1 不同变质程度煤甲烷吸附量

变质阶段	原苏联		淮南矿院		西安煤科院	
	$V^r(\%)$	$Q(P=30\text{kg/cm}^2)$	$R^r(\%)$	$Q(P=30\text{kg/cm}^2)$	$V^r(\%)$	$Q(P=30\text{kg/cm}^2)$
长焰煤 气煤	38	17.0	0.35	22.33	41.22	18.816
	37	14.6	0.35	20.54	37.22	22.676
	35	10.0	0.80	20.09	37.33	18.630
	30	13.9	0.80	16.99	39.56	17.851
肥煤 焦煤	28	14.6	0.80	16.37	37.90	6.171
	28	16.4	0.75	20.34	37.98	13.086
	27	12.6	0.78	25.66	29.34	14.384
	27	11.9	0.83	25.05	21.8	16.034
	20	15.0	0.83	19.47	19.07	14.014
	20	17.3	1.66	15.73	18.17	11.825
	19	19.5	1.66	23.19	20.25	15.519
	19	16.4	1.66	15.89	18.53	16.516
瘦煤 无烟煤	17	17.6	3.0	31.47	19.93	18.913
	16	15.1	3.8	32.25	14.97	22.744
	15	19.3	4.09	32.36	15.92	21.435
	7	29.0		35.02	9.94	26.352
	4	32.6			7.4	31.269

* 转引自西安煤科院, 1988

3. 颗粒比表面积

煤的吸附气含量与煤颗粒比表面积成正比,煤的比表面积越大,其吸附气含量越大。每克煤的比表面积可达 $10\sim 100\text{m}^2$,因此,煤与同体积的常规储集岩相比,具有吸附并容纳大量气体分子的能量,其储集天然气的能力是普通储集岩的 $2\sim 3$ 倍。

4. 煤岩显微组分

А. Л. Б. акадэдэ 在研究了库兹涅茨等盆地煤的吸附气含量后发现,丝质组吸附甲烷的能力随变质程度的提高呈直线上升,而镜

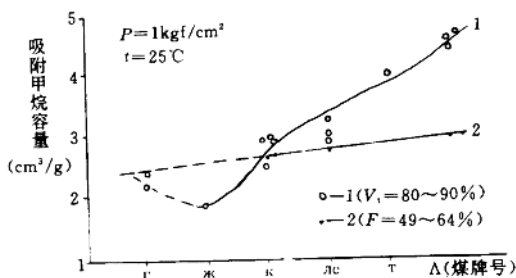
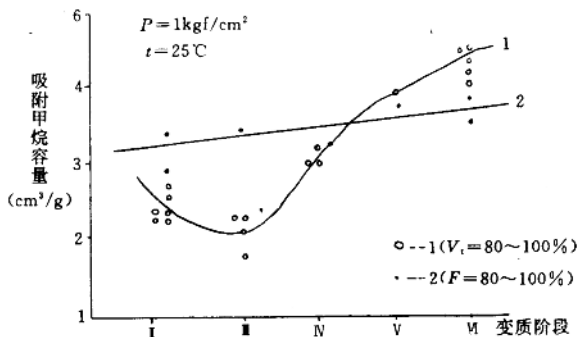


图 2-3 库涅茨盆地镜质组(1)和丝质组(2)吸附甲烷容量与变质程度的关系

A. 莫希层和佛努特连层; B. M_3 煤层

(据 A. n. cεkanHHa, 1980)

质组呈曲线变化(图 2-3),且变化幅度较大,以肥煤阶段吸附甲烷容量最小。

5. 温度和压力

随着温度的增加,气体分子的活性增强,吸附气含量减少;随

着压力的增大,吸附气含量明显增加。

6. 含水性

煤层中的水分不仅可以占据孔隙空间,而且占据煤颗粒的活性表面。所以,煤层含水量越大,其吸附气量越小。

二、游离气

游离气是指储存在孔隙或裂隙中能自由运移的天然气,煤层的储集空间包括基质孔隙和裂隙(内生裂隙和外生裂隙)两部分。

1. 基质孔隙

基质孔隙是有机质成煤时,未被矿物质及其他物质充填的植物细胞,多发育于丝质和木质丝炭中。

按照煤岩孔隙直径的大小可划分为四个级别:大孔隙(500 Å)、中孔隙(200~500 Å)、小孔隙(8~200 Å)和微孔隙(<8 Å)。

基质孔隙的发育程度与煤的变质阶段和煤显微组分密切相关:

表 2-2 不同变质程度煤的开敞孔隙分布(据 Rightmire, 1984)

煤 阶	C (%)	孔隙分布(%)			
		<12 Å	12~300 Å	>300 Å	
无烟煤	90.8	75.0	13.1	11.9	
低挥发份烟煤	89.5	73.0	0	27.0	
中挥发份烟煤	80.3	81.9	0	38.1	
高挥发份烟煤	A	83.8	48.5	0	51.5
	B	81.3	29.9	45.1	25.0
	C	79.9	47.0	32.5	20.5
	C	77.2	41.8	38.6	19.6
	B	76.5	66.7	12.4	20.9
	C	75.5	30.2	52.6	17.2
褐煤	71.7	19.3	3.5	77.2	
褐煤	71.2	40.9	0	59.1	
褐煤	63.3	12.3	0	87.7	

(1) 随变质程度的提高,小孔隙和微孔隙的比例增大,相应地中孔隙和大孔隙减少(表 2-2),即低变质阶段的煤以中~大孔隙为主;高变质阶段的煤以小~微孔隙为主;

(2) 总孔隙度与变质程度的关系见图 2-4,由图中看出:由长焰煤演变成焦煤和瘦煤时,孔隙度由 $0.084\text{m}^3/\text{t}$ 减少到 $0.045\text{m}^3/\text{t}$,而至无烟煤又重新上升,达到 $0.088\text{m}^3/\text{t}$;

(3) 在高挥发性烟煤中,丝质组孔隙性最好,其孔隙一般为 $50\sim 500\text{\AA}$,镜质组也具有较好的孔隙性,一般为 $20\sim 200\text{\AA}$ 。

2. 裂隙

煤的裂隙是指在成煤作用过程中,煤受到自然界各种应力的影响所造成的裂开现象。按成因不同可分为内生裂隙和外生裂隙两种。

内生裂隙是在煤化作用过程中;煤中的凝胶物质受到温度、压力等因素的影响,体积均匀收缩产生内张力而形成的一种裂隙。内生裂隙的发育程度随变质程度的不同而呈规律

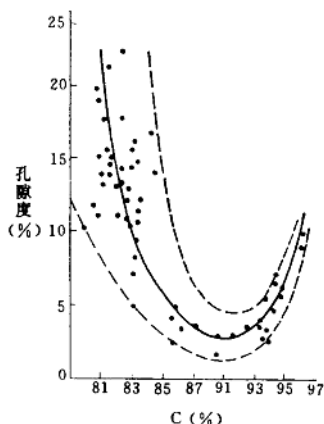


图 2-4 煤化程度与孔隙度的关系
(据朱之培,高晋生,1984)

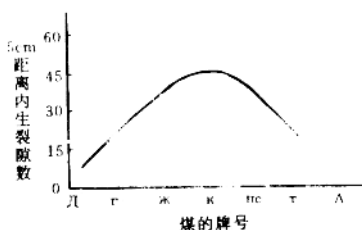


图 2-5 煤的内生裂隙与变质程度的关系
(引自武汉地质学院煤田教研室,煤田地质学)
(煤牌号请参看附录 I)