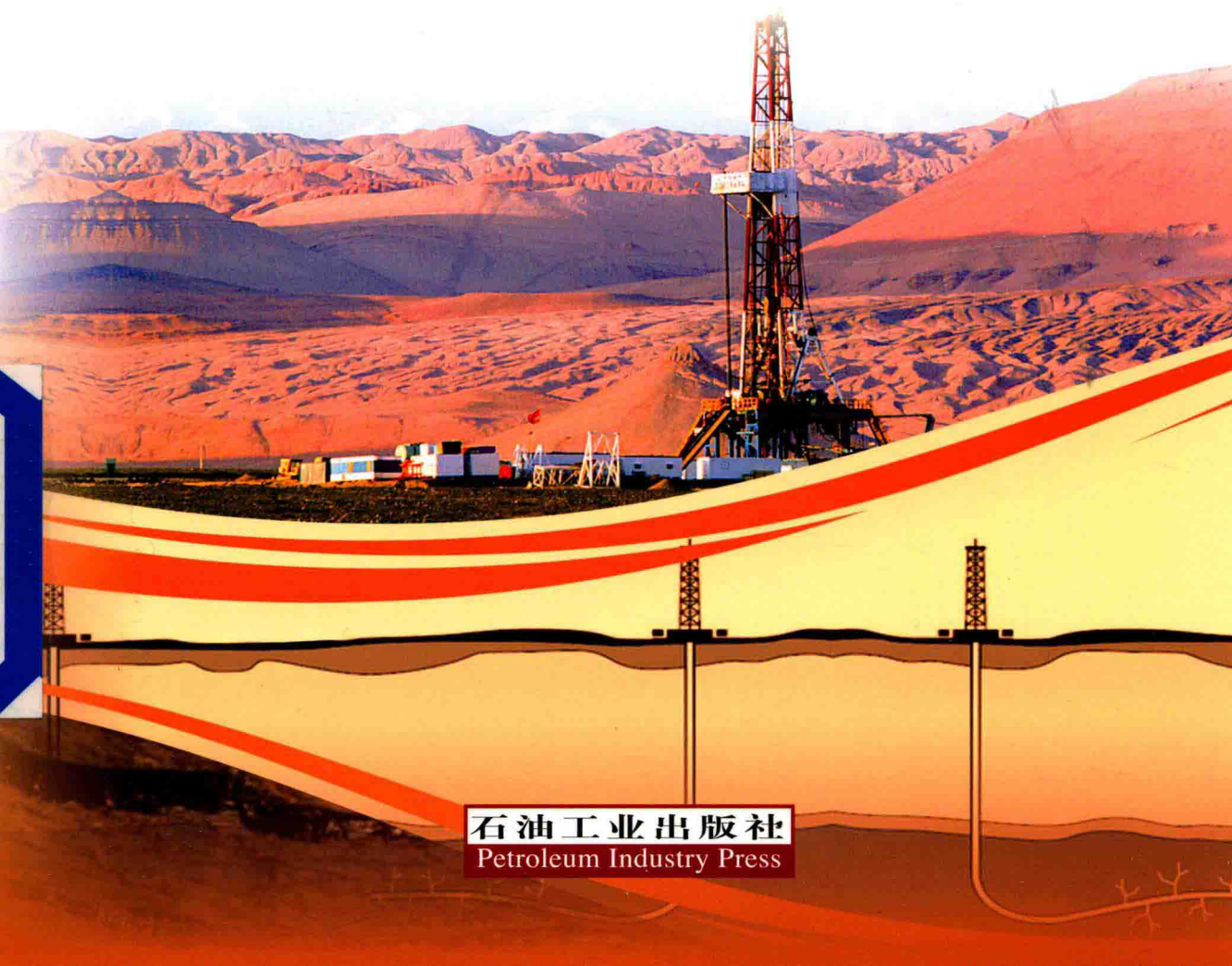




石油高等院校特色规划教材

煤层气与页岩气概论

何岩峰 王卫阳 田树宝 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色规划教材

煤层气与页岩气概论

何岩峰 王卫阳 田树宝 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书集煤层气和页岩气的地质、资源勘查、钻完井和生产工艺、技术与处理工艺等为一体,介绍了国内外煤层气和页岩气资源勘探开发的概况;采用对比的方式介绍了煤层气和页岩气形成、赋存及勘探开发中的理论知识、具体的生产和增产设计方法,可以帮助读者更好地理解这两类资源勘探开发中的异同之处;不仅介绍了相关的理论知识,而且介绍了现场的实际工艺流程、经典的实验分析方法、主要生产工具和仪器仪表的使用方法。

本书可作为大专院校的师生学习煤层气和页岩气勘探开发基础知识的教材或参考书,也可供从事煤层气和页岩气勘探开发的广大科技人员、研究人员及一线操作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气与页岩气概论/何岩峰,王卫阳,田树宝主编. —北京:石油工业出版社,2017. 4

石油高等院校特色规划教材

ISBN 978—7—5183—1813—1

I. ①煤… II. ①何…②王…③田… III. ①煤层—地下气化煤气—高等学校—教材②油页岩—高等学校—教材 IV. ①P618. 11
②P618. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 042798 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523693

图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京市密东科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:9. 25

字数:233 千字

定价:25. 00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

世界上非常规天然气资源量远大于常规天然气资源量。我国非常规天然气资源量是常规天然气资源量的 1.5 倍,所以煤层气和页岩气资源的开发日益受到国内石油企业的重视。由于非常规天然气在储层特征、源储配置、成藏特征、渗流机理、分布规律和勘探开发方式等方面均有别于常规天然气,为帮助读者了解煤层气与页岩气开发的基础知识与技术,本书在总结分析国内外相关书籍、期刊、专利等资料的基础上,采用将煤层气与页岩气相关知识进行对比的方式,对这两类新型资源进行了介绍。

本书主要用作各类学校“煤层气与页岩气工程概论”课程的教材。该课程开设于“采气工程”“采油工程”“油藏工程”“钻井与完井工程”课程之后,帮助大学生和工程技术人员快速了解煤层气、页岩气勘探开发相关的理论知识和现场工艺技术进展。

本书系统介绍了煤层气地质学的内容,包括煤层气的形成、基本特征、储层特征、赋存及成藏机制;介绍了煤层气的勘探原理、测井技术、资源量的计算方法与选区评价;介绍了煤层气气藏工程相关理论和开发方案编制方法及内容;介绍了煤层气钻完井工艺、开采工艺和集输处理工艺,分析了国内外在煤层气处理工艺上的区别。随后,本书还介绍了页岩气的形成、基本特征、储层特征和赋存成藏机制;介绍了页岩气的测井技术、钻井与完井工艺、开采工艺和增产措施、产能预测方法、矿场集输方法;介绍了国内外的页岩气资源开发情况和在生产中的环保要求。

本书内容丰富、图文并茂,不仅介绍了基础知识,而且介绍了具体生产工艺,引用了最新文献中的理论与技术进展,也有对于国内外非常规资源开发情况的综述,有较强的理论性和实用性。

全书由何岩峰、王卫阳和田树宝主编,参加编写工作的人员还有徐慧、张少辉等。其中王卫阳和田树宝主要撰写了第一编的主要内容;何岩峰主要编写了第二编的主要内容。张青青、刘琳、张凯、束方启等提

供了资料并参与了书稿的整理。全书由何岩峰统稿审定。此外,本书的编写过程中得到了加拿大卡尔加里大学 John Chen 教授、刘晖等的帮助。徐慧试用本教材并提出了宝贵的修改建议。在此,对他们的辛勤工作及有关人员的支持表示衷心感谢。

由于笔者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请各位专家、同行及广大读者给予指正。

编者

2017 年 1 月

目 录

绪论	1
----	---

第一编 煤层气概论

第一章 煤层气地质学	3
第一节 煤层气的形成和基本特征	3
第二节 煤层气储层特征	11
第三节 煤层气赋存及成藏机制	20
第二章 煤层气勘探	30
第一节 煤层气勘探方法	30
第二节 煤层气测井技术	36
第三节 煤层气资源计算与选区评价	39
第三章 煤层气气藏工程	47
第一节 煤层气产出机理	47
第二节 煤层气开发合理井网	52
第三节 煤层气开发方案编制	55
第四章 煤层气钻井完井工艺	59
第一节 煤层气钻井技术	59
第二节 煤层气完井技术	65
第三节 煤层气储层保护技术	69
第五章 煤层气开采技术	72
第一节 煤层气(瓦斯)抽放开采	72
第二节 煤层气地面排水采气技术	77
第三节 煤层气压裂增产技术	84
第六章 煤层气集输技术	90
第一节 煤层气矿场集输	90
第二节 典型煤层气集输工艺	94

第二编 页岩气概论

第七章 页岩气地质学	100
第一节 页岩及其基本类型	100
第二节 页岩气的生成机理和成藏机理	101
第三节 页岩气储层特征和资源量评价	104

第八章 页岩气资源勘察和实验分析技术..... 109

第一节 页岩气地球化学分析技术..... 109

第二节 页岩气地球物理勘探技术..... 110

第三节 页岩气实验测试技术..... 112

第九章 页岩气生产工艺..... 115

第一节 页岩气生产工艺概述..... 115

第二节 页岩气井钻完井技术..... 116

第三节 水力压裂技术..... 121

第四节 页岩气井产能预测方法..... 128

第十章 页岩气的处理..... 130

第十一章 国内外页岩气开采现状..... 132

第一节 北美地区页岩气开发历程..... 132

第二节 国内页岩气开发现状..... 134

参考文献..... 136

绪 论

圈闭着油气资源的地下岩层,称为油气藏。油气藏并不是埋存于地下的大油池,而是由很多存在于岩石矿物颗粒间相互连通的孔隙组成的,岩石矿物微粒组成了油藏岩石的基质。油藏物性的好坏取决于孔隙度和渗透率。孔隙度是岩石颗粒间的孔隙空间,孔隙度越大,能储存的油气就越多。但是孔隙度不足以说明油藏物性的好坏,因为孔隙必须要连通起来,油气才能流动。可以用渗透率描述孔隙连通的程度,其常用单位是达西(D)。渗透率是区分常规天然气和非常规天然气的关键指标之一。物性较好的油气藏渗透率可以达到 1D 以上,页岩气藏的渗透率则一般小于 $1\mu\text{D}$,甚至低至纳达西的级别。

非常规油气藏主要是连续型分布的油气藏,无明显圈闭与盖层界限,无统一油气水界面和压力系统,含油气饱和度差异大,通常为油气水多相共存。非常规天然气包括煤层气、页岩气、致密砂岩气、深层气、天然气水合物等典型非生物气,也包括火山岩、缝洞型碳酸盐岩和变质岩等非常规储层中的天然气。常规天然气和非常规天然气就其化学成分来讲没什么不同,只是气藏的地质特征参数有所区别。

煤层气赋存于煤层之中,煤是很好的存储介质,多数天然气被吸附在煤的表面。单位体积的煤比常规天然气藏岩石能够多存储 2~3 倍的天然气。

页岩气一般赋存于渗透率极低的气藏之中,致密的岩石构造对气体的运移形成了较大的阻力。由于页岩是富含黏土的沉积岩,所以其渗透率极低,天然气吸附在页岩中的有机物表面,或以自由气的状态赋存于岩石中的孔隙内。

非常规天然气在储层特征、源储配置、成藏特征、渗流机理、分布规律或勘探开发方式等方面均有别于常规天然气(表 1)。此外,页岩气与煤层气的开发方式也有所区别(图 1、表 2)。

表 1 非常规天然气与常规天然气的地质区别

类别	非常规天然气	常规天然气
储层特征	非常规储层,突破传统下限	常规储层
源储配置	源储对接或源储合一	源外成藏
成藏特征	浮力作用	浮力聚集或重力分异
渗流机理	非达西渗流	达西渗流
分布规律	连续型分布	单体型、集群型分布
勘探开发方式	水平分支井、分段压裂	直井、酸化等常规勘探开发方式

世界常规天然气储量为 $471\times 10^{12}\text{m}^3$,而非常规天然气资源规模合计为 $3922\times 10^{12}\text{m}^3$ (水合物 $3000\times 10^{12}\text{m}^3$,煤层气 $256\times 10^{12}\text{m}^3$,页岩气 $456.2\times 10^{12}\text{m}^3$,致密气 $210\times 10^{12}\text{m}^3$),非常规天然气资源量远大于常规天然气资源量。我国非常规天然气资源量大、种类多、分布广,致密砂岩气、煤层气、页岩气和火山岩气资源总量约为 $84.5\times 10^{12}\text{m}^3$,是常规天然气资源量的 1.5 倍(表 3)。我国日益重视煤层气和页岩气资源的开发,于 2011 年颁布了《煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十二五”规划》和《页岩气发展规划(2011—2015 年)》,倡导国内企业进行非常规天然气资源的开发。

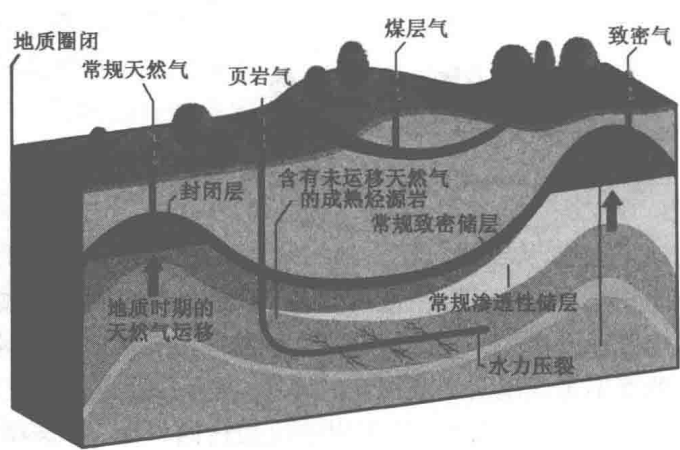


图 1 天然气的赋存与开采示意图(据 Total 公司)

表 2 页岩气藏与煤层气藏开发方式的异同

异同		煤层气藏	页岩气藏
相同点		气藏中都存在着吸附气与游离气,开发方式都是以清水压裂为主	
不同点	储层深度	一般小于 1000m	1000~4000m
	渗流通道	充分利用割理	一般天然裂缝比较发育
	气体组成	游离气较少,以吸附气为主	游离气和吸附气各占约 1/2
	井的类型	垂直井、水平井、羽状水平井、U 形井、V 形井等	水平井为主,也有少量的垂直井
	压裂改造	一般只有直井进行压裂	直井、水平井都需要进行压裂
	开发工艺	排水降压开发气体	排气降压开发气体
	生产情况	压后 1~2 年出现产气高峰	压后的初期产量一般是最大产量

表 3 我国非常规天然气可采资源状况

种类	资源量, 10^{12}m^3
致密砂岩气	>12
煤层气	36.8
页岩气	30.7
火山岩气	>5
天然气水合物	>80

第一编 煤层气概论

第一章 煤层气地质学

煤层气(coalbed methane)是一种由煤层自生自储的非常规天然气,是一种赋存在煤层中的天然气体,化学成分以甲烷为主,主要吸附在煤基质颗粒表面,部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中。在煤形成过程中,成煤物质发生了复杂的物理化学变化,挥发分含量和水分减少,发热量和固定碳含量增加,同时生成了以甲烷为主的气体成分,即煤层气。

煤型气是含煤岩系中煤和分散有机质在煤形成过程中产生的天然气体,以游离状态、吸附状态和溶解状态赋存于煤层和其他岩层内。赋存于煤层中的煤型气称为煤层气,赋存于围岩中的煤型气则称为煤成气。瓦斯是煤矿井下除大气以外的气体的总称,包含赋存在煤层及其他岩层里并涌入到矿井的天然气体、矿井生产过程中生成的废气、井下各种化学及生物化学反应生成的气体、深源放射性物质蜕变生成的气体、地下水释放出的气体等多种来源的气体。

煤层气是一种新型洁净能源,其开发利用不仅可在一定程度上弥补常规油气资源的不足,还可以减轻矿井灾害程度、降低矿井生产成本、减少温室气体(甲烷)的排放、保护大气环境。美国是世界上最早实现煤层气工业性开发的国家。自 20 世纪 70 年代以来,在美国的带动下,中国、加拿大、澳大利亚、英国、俄罗斯等 30 余个国家先后进行了煤层气开发。煤层气资源已受到我国的高度重视。1999 年国土资源部等五个部委的通知中,将煤层气与石油、天然气、放射性矿产并列为独立矿产资源,对其实行国家统一管理。

第一节 煤层气的形成和基本特征

一、煤的形成与煤的组分

1. 煤的形成

煤是一种固态的可燃有机岩,是由地质历史时期的古植物残骸经过复杂的生物化学、物理化学以及地球化学变化转变而来的。古植物由死亡、遗体堆积一直到转变为煤经过了一系列复杂的演变过程,在这个转变过程中所经受的各种作用总称为成煤作用。

成煤作用大致可分为两个阶段:第一阶段主要发生于地表的泥炭沼泽、湖泊以及浅海滨岸

地带,植物死亡后的遗体在各种微生物的参与下,不断地分解、化合、聚积,结果使低等植物转变为腐泥,高等植物则形成泥炭,因此成煤作用的第一阶段称为腐泥化阶段或泥炭化阶段。已形成的泥炭或腐泥,由于地壳沉降等原因被沉积物覆盖掩埋于地下深处,成煤作用就进入第二阶段,即煤化作用阶段。在煤化作用阶段中,起主导作用的是使煤在温度、压力条件下进一步转化的物理化学作用,即煤的成岩作用和变质作用。泥炭转变为年轻褐煤所经受的作用,称作成岩作用;从年轻褐煤再转变为褐煤、烟煤、无烟煤所经受的作用,称为变质作用。

2. 煤的组分

煤是由有机物质和无机矿物质混合组成。肉眼可观察到煤是由各种宏观煤岩成分组成的,这些宏观煤岩成分组合成不同的宏观煤岩类型。用显微镜观察可发现,煤是由各种显微煤岩组分所组成的,这些显微煤岩组分组合成不同的显微煤岩类型。不同的宏观煤岩成分和宏观煤岩类型由不同的显微煤岩类型组成。

宏观煤岩成分是用肉眼可以区分的煤的基本组成单位,包括镜煤、亮煤、暗煤和丝炭。镜煤和丝炭是简单的煤岩成分,暗煤和亮煤是复杂的煤岩成分。各种宏观煤岩成分的组合有一定的规律性,造成煤层中有光亮的分层,也有暗淡的分层。这些分层厚度一般为十几厘米至几十厘米,在横向上比较稳定。按宏观煤岩成分的组合及其反映出来的平均光泽强度,可划分为四种宏观煤岩类型,即光亮型煤、半亮型煤、半暗型煤和暗淡型煤。

在光学显微镜下能够识别出来的组成煤的基本成分称为显微组分。由植物遗体变化而成的为有机显微组分,而矿物杂质则称为无机显微组分。煤的有机显微组分可划分为三大组:镜质组、惰质组和壳质组。镜质组是煤中最常见最重要的显微组分,它是由植物的根、茎、叶等木质纤维组织在覆水的还原环境中,经过腐殖化作用和凝胶化作用而形成。镜质组的芳香烃和氢的含量较高。惰质组是煤中常见的显微组分,它是由植物的根、茎、叶等组织在比较干燥的氧化条件下,经过丝炭化作用后在泥炭沼泽中沉积下来所形成的,也可以由泥炭表面经炭化、氧化、腐败作用和真菌的腐蚀所造成。与其他两组显微组分相比,惰质组的氢含量和挥发分最低,碳含量最高。壳质组又称稳定组、类脂组。它是由比较富含氢的植物物质,如孢粉质、角质、木栓质、树脂、蜡、橡胶、胶乳、脂肪和油所组成;此外,蛋白质、纤维素和其他碳水化合物的分解产物也可参与壳质组的形成。壳质组组分的氢含量高,加热时能产出大量的焦油和气体,黏结性较差。煤的无机显微组分是在显微镜下观察到的矿物质,矿物质包括黏土矿物、硫化物、碳酸盐矿物、氧化物、氢氧化物等,其中以黏土类和硫化物类矿物为主。

在煤化作用过程中,煤有机显微组分含量的多少将直接关系到煤层气的烃源条件。另外,各种有机显微组分虽然都有一定的生烃能力,但是由于不同的组分其物质组成和化学结构不同,热解生烃的能力和成烃规律也有差异。热模拟试验表明,在 600℃ 时壳质组、镜质组和惰性组烃类气体生成量之比为 2.2 : 1.0 : 0.8。虽然镜质组生烃能力低于壳质组,但腐殖煤中镜质组为主要组分,从整体来看镜质组是形成煤层甲烷更为重要的母质。

3. 煤阶的划分

煤阶又称为煤级,代表了煤化作用中能达到的成熟度的级别,煤阶是随着埋藏加深、温度增加而改变的,随着埋藏深度的增大,煤从褐煤、亚烟煤、烟煤到无烟煤逐渐过渡。煤阶有两种不同的称谓与层次:一种称为低煤阶煤、中煤阶煤和高煤阶煤;另一种常用的称谓有褐煤、亚烟煤、烟煤和无烟煤等。确定煤的煤阶是很重要的,不同煤阶煤的产气量、储层性质大不相同。

一般而言,煤成熟度越高,生成的气体量也越多。较不成熟的煤层如褐煤等,由于成熟度不够,将产生并保持较少的煤层气;而过于成熟的煤岩如无烟煤,由于其渗透率太低,不能成为良好的煤层气储层;因而烟煤阶段的煤层可能是较好的煤层气储层。

含碳量、含氢量或挥发分含量等评价指标可以用来确定煤层的煤阶,而“镜质组反射率”技术是测定煤阶的最佳方法。此方法是通过测量煤层样品中反射出来的入射光线多少来确定的。镜质组最大反射率指在显微镜下,于油浸及 546nm 波长条件下镜质组的反射光强度与垂直入射光强度的百分比,以 $R_{\text{omax}}(\%)$ 表示。镜质组反射率随着煤成熟度的增加而有规则地增大,且与煤的成分无关。煤阶划分推荐方案见表 1-1。

表 1-1 煤阶划分推荐方案

变质阶段		牌号	$R_{\text{omax}}, \%$
褐煤	0		<0.5
烟煤	1	长焰煤	$0.5\sim0.65$
	2	气煤	$0.65\sim0.90$
	3	肥煤	$0.90\sim1.20$
	4	焦煤	$1.20\sim1.70$
	5	瘦煤	$1.70\sim2.00$
	6	贫煤	$2.00\sim2.50$
无烟煤	7	无烟煤 3 号	$2.50\sim4$
		无烟煤 2 号	$4\sim6$
		无烟煤 1 号	>6

二、煤层气的形成

煤形成的同时也生成了以甲烷为主的气体。与煤化作用的两个过程即生物成因过程和热成因过程相对应,分别生成了生物成因气和热成因气(表 1-2)。

表 1-2 生物成因和热成因煤层气产生的阶段(据 Scott,1994)

煤层气产生阶段	镜质组反射率 $R_o, \%$
原生生物成因甲烷	<0.30
早期热成因	$0.50\sim0.80$
最大量的湿气生成	$0.60\sim0.80$
强热成因甲烷开始产生	$0.80\sim1.00$
凝析油开始裂解成甲烷	$1.00\sim1.35$
最大量的热成因甲烷生成	$1.20\sim2.00$
大量湿气生成的最后阶段	1.80
大量热成因甲烷生成的最后阶段	3.00
次生物成因甲烷	$0.30\sim1.50$

1. 生物成因气

生物成因气是有机质在微生物降解作用下的产物。生物成因气是指在相对低的温度(一

般低于 50℃)条件下,通过细菌的作用,在煤层中生成的以甲烷为主并含少量其他成分的气体。生物成因气的生成有两种机制:其一,二氧化碳的还原作用生成甲烷;其二,醋酸、甲醇、甲胺等经发酵作用转化成甲烷。尽管两种作用都在近地表环境中进行,但据组分研究,大部分古代聚集的生物气可能来自二氧化碳的还原作用。煤层中生成大量生物成因气的有利条件是:大量有机质的快速沉积、充裕的孔隙空间、低温和高 pH 值的缺氧环境。按照生气时间、母质以及地质条件的不同,生物成因气有原生生物成因气和次生生物成因气两种类型,两者在成因上无本质差别。

1) 原生生物成因气

原生生物成因气是在煤化作用阶段早期,泥炭沼泽环境中的低变质煤(泥炭—褐煤)经微生物作用使有机质发生一系列复杂过程所生成的气体,又称为早期生物成因甲烷。由泥炭至褐煤阶段可生成原生生物甲烷气量约为 38m³/t。该类气体的生成量约占 200℃以下煤层气总生成量的 10%。由于原生生物成因气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,或溶解于水体中,且泥炭或低变质煤对气体的吸附作用也弱,仅有少量气体聚集在煤层内。

2) 次生生物成因气

含煤岩系在后期被构造作用抬升并剥蚀到近地表,细菌通过流动水(多为大气降水)运移到煤层水中,在低、中煤级煤中,当温度、盐度等环境条件适宜微生物生存时,在相对低的温度下(一般低于 56℃),细菌通过降解和代谢作用将煤层中已生成的湿气、正烷烃和其他有机化合物转变成甲烷和二氧化碳,即形成次生生物成因气。

次生生物成因气的形成时间一般较晚(几万至几百万年前),煤层中存留的生物成因气大部分属于次生生物成因气。次生生物成因气的生成和保存条件为:煤级为褐煤—焦煤,煤层所在区域发生过隆起(抬升)作用;煤层有适宜的渗透性;沿盆地边缘有流水回灌到盆地煤层中;有细菌运移到煤层中;煤层具有较高的储层压力和能储存大量气体的圈闭条件。

2. 热成因气

热成因气是在温度(>50℃)和压力作用下,煤有机质发生一系列物理、化学变化,煤中大量富含氢和氧的挥发分物质主要以甲烷、二氧化碳和水的形式释放出来。在较高温度下,有机酸的脱羧基作用也可以生成甲烷和二氧化碳。

随着褐煤埋藏深度的增加,温度上升,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(图 1-1)。

Messner 认为:当 R_{omax} 大于 0.73% (R_{omax} 为镜质组最大反射率)、干燥无灰基挥发分含量大于 37.8% 时,热成因煤层气开始大量生成。Law 则认为热成因煤层气开始大量生成时的温度为 88~93℃, R_{omax} 为 0.80%。Rightmire 认为:当 R_{omax} 为 0.60%,挥发分为 40.24%,即相当于高挥发分烟煤 C 时(相当于我国的褐煤—长焰煤阶段),热成因煤层气开始生成,其生成高峰在 150℃左右,相当于中挥发分烟煤、低挥发分烟煤、半无烟煤(相当于我国的焦煤—贫煤阶段)。因此,张新民等参考天然气的成因分类,以 $R_{\text{omax}} = 1.90\%$ 为界,将 $0.50\% < R_{\text{omax}} < 1.90\%$ 的成熟阶段划分为热解气阶段; $R_{\text{omax}} > 1.90\%$ 的过成熟阶段,对应于裂解气。因为煤是腐殖型干酪根(Ⅲ型干酪根),成岩与煤化作用期间不存在明显的液态烃过程,热解气、裂解气划分不是十分严格。

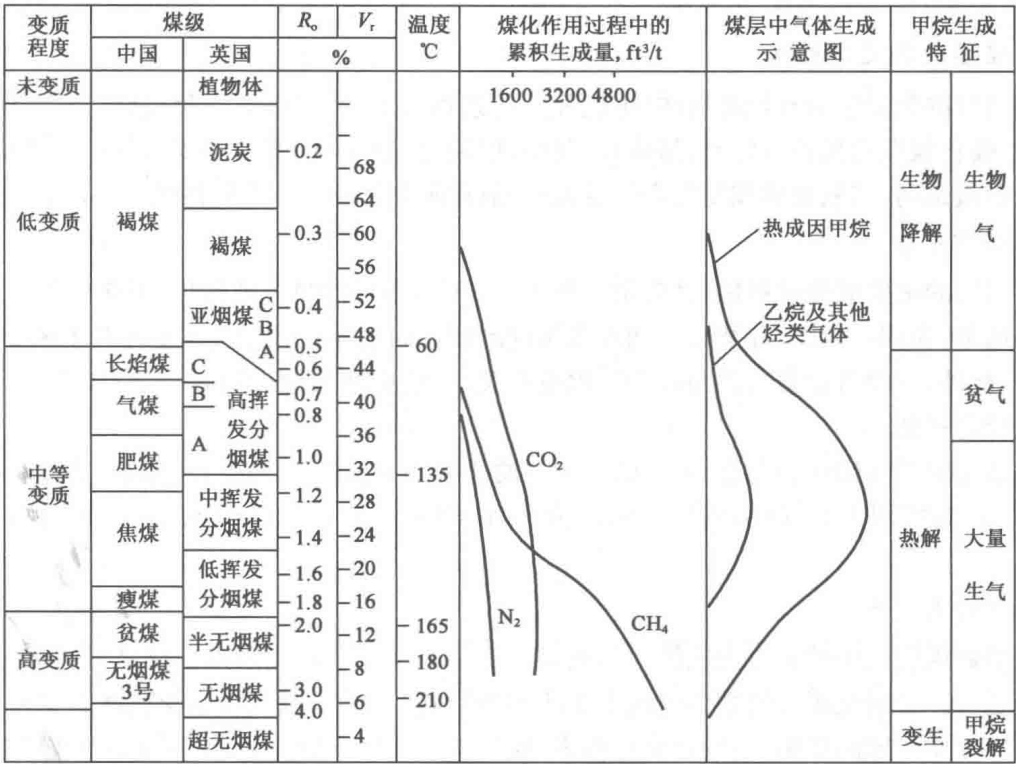


图 1-1 煤化作用阶段及气体生成(据 Stach,1982)

据 Hunt 等研究:在煤化学作用早期(地层温度 $<120^{\circ}\text{C}$),生成的气体以二氧化碳为主,在高挥发分烟煤与中挥发分烟煤分界处(相当于我国的肥煤阶段)所生成的二氧化碳是甲烷的两倍多。在该点之后,甲烷气的生成量迅速增加,产气高峰在中挥发分烟煤与低挥发分烟煤的分界处(相当于 150°C)。此时,镜质组的反射率达到 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,镜质组反射率超过 4.0% ,逐渐停止生气过程。

形成热成因甲烷大致分三个阶段:

- (1)褐煤至长焰煤阶段:生成的气量多,成分以 CO_2 为主,占 $72\%\sim 92\%$,烃类 $<20\%$ 且以甲烷为主,重烃气 $<4\%$ 。
- (2)长焰煤至焦煤阶段:烃类气体迅速增加,占 $70\%\sim 80\%$, CO_2 下降至 10% 左右。烃类气体以 CH_4 为主,但含较多的重烃,至肥煤、焦煤时重烃可占 $10\%\sim 20\%$,该阶段是主要的生油阶段,如壳质组含量多,则油和湿气含量也多。
- (3)瘦煤至无烟煤阶段:烃类气体占 70% ,其中 CH_4 占绝对优势($97\%\sim 99\%$),几乎没有重烃。

煤阶和有机质性质的不同,其产气量差异很大。煤阶高,产生的煤型气就多。据报道,1t 褐煤可产生 $38\sim 68\text{m}^3$ 煤型气,1t 长焰煤可产生 $138\sim 168\text{m}^3$ 煤型气,气煤为 $182\sim 212\text{m}^3/\text{t}$,肥煤为 $199\sim 230\text{m}^3/\text{t}$,焦煤为 $240\sim 270\text{m}^3/\text{t}$,瘦煤为 $257\sim 287\text{m}^3/\text{t}$,贫煤为 $295\sim 330\text{m}^3/\text{t}$,无烟煤为 $346\sim 422\text{m}^3/\text{t}$ 。

三、煤层气的基本特征

1. 煤层气的化学组分

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。

1) 烃类气体

煤层气的主要成分是甲烷,其含量一般大于 80%,重烃含量一般较低,其他烃类气体含量极少。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,重烃含量常常还与煤变质程度有关,一般中变质煤中重烃含量高,而低、高变质煤中重烃含量低。

通常用甲烷气体(C_1)与总烃量($C_1—C_4$)的比率作为确定气体的干度指标,即 C_1 / C_{1-4} 值大于 99%,为特别干的气体,95%~99%为干气,85%~95%为湿气,小于 85%为特别湿的气体。

2) 非烃类气体

大多数煤层气中的非烃类气体含量通常小于 20%,其中氮气约占三分之二,二氧化碳约占三分之一。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和煤变质程度的影响,一般越靠近地表,氮气和二氧化碳的含量越高;煤变质程度越高,氮气和二氧化碳的含量越低。

虽然煤层气的成分都是以甲烷为主,然而在不同盆地、同一盆地的不同部位、不同煤层、不同埋深、不同煤阶以及不同煤层气井之间,煤层气的组分往往出现较大的差异。控制煤层气成分的主要因素有:(1)煤的显微组分,特别是富氢组分的丰度;(2)储层压力,它影响煤的吸附能力;(3)煤化作用程度,即煤阶或煤级;(4)煤层气解吸阶段,吸附性弱或浓度高的组分先解吸;(5)水文地质条件,它通过输送细菌产生次生生物气而影响煤层气的成分。

2. 煤层气的物理性质

1) 煤层气分子的大小和相对分子质量

煤层气分子的大小介于 0.32~0.55nm 之间(表 1-3)。煤层气分子中甲烷的偏心因子最小,只有 0.008。煤层气分子平均自由程(气体分子运动过程中与其他分子两次碰撞之间的距离)约为其分子平均直径的 200 倍。相对分子质量是由组成煤层气的各种分子的百分含量累加而成,称为表观分子量。

2) 煤层气的密度

煤层气的密度定义为标准状态下(1 个大气压,温度 15.55℃)单位体积煤层气的重量,单位为 kg/m^3 。煤层气在地下的密度随相对分子质量及压力的增大而增大,随温度的升高而减小。煤层气的相对密度是指同温度、压力条件下煤层气的密度与空气密度的比值。

3) 煤层气的黏度

煤层气的黏度很小,在地表常压、20℃下时,甲烷的动力黏度为 $1.084 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。煤层气的黏度与气体的组成、温度、压力等条件有关,在正常压力下,黏度随温度的升高而变大,这与分子运动加速、气体分子碰撞次数增加有关,而随相对分子质量增大而变小。在较高压力下,

表 1-3 煤中吸附气体的参数(0℃,0.101325MPa)

参数	组分 1	组分 2	组分 3	组分 4	组分 5	组分 6	组分 7
吸附介质	CH ₄	H ₂ O	N ₂	CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂ S	H ₂
相对分子质量	16.042	18.011	28.013	44.010	30.070	34.070	2.016
分子直径,nm	0.33~0.42	0.29	0.32~0.38	0.33~0.47	0.44~0.55		
临界温度,℃	-82.57	374.1	-126.2	31.06	32.37	100.39	-239.90
临界压力,MPa	4.604	21.83	3.399	7.384	4.880	9.05	1.297
平均自由程,nm	53.0		74.6	83.9			
沸点,℃	-161.49	100	-195.80	-78.50	-88.60	-60.33	-252.70
动力黏度,10 ⁻⁵ Pa·s	1.084		1.765	1.466			
偏心因子	0.008	0.344	0.040	0.225			
液态密度,g/cm ³	0.425	0.998		0.777			
15.5℃时相对密度	0.554		0.967	1.519	1.038	1.178	0.069
热值,kJ/m ³	37.62		不可燃	不可燃	65.90	23.73	12.07
溶解系数,m ³ /(m ³ ·atm)	0.033		0.016	0.87	0.047	2.58	

煤层气的黏度随着压力增加而增大,随着温度的升高而减小,随着相对分子质量的增大而增大。

4)煤层气的临界点参数

临界温度是指气相纯物质维持液相的最高温度,高于这一温度,气体即不能用简单升高压力的办法(不降低温度)使之转化为液体;临界压力是指气、液两相共存的最高压力,即在临界温度时,气体凝析所需的压力。高于临界温度,无论压力多大,气体不会液化;高于临界压力,不管温度多少,液态和气态不能同时存在。只有当温度和压力均超过其临界温度和临界压力时,才称为超临界状态。

地层条件下,煤层甲烷超临界吸附的现象是存在的。但只有当煤层甲烷压力(气压)超过 4.60MPa 才真正出现超临界流体。对于原位且处于封闭系统的煤储层,储层中水压等于气压,只要煤层埋深超过 500m,煤层甲烷就可能成为超临界流体。

对于甲烷和氮气,任一埋深储层温度均高于临界温度,无论压力多大,均不会液化;对于二氧化碳,当储层温度低于 31.1℃,对于乙烷,当储层温度低于 32.4℃,而储层压力高于液化压力,二者可以呈液态形式存在。按正常地温梯度 3℃/100m、正常储层压力梯度 0.98MPa/100m,设恒温带深度为 20m、温度为 10℃,则埋深 500m 左右,储层温度约为 25℃、储层压力为 4.9MPa,此时二者均低于临界温度和压力,二氧化碳和乙烷以气态形式存在;当埋深达到 800m,储层温度约为 34℃,高于临界温度,二氧化碳和乙烷仍为气态。但当二氧化碳压力大于 7.38MPa、乙烷压力大于 4.98MPa,二氧化碳和乙烷有可能成为超临界流体;只有在 500~800m 范围内的局部层段(封闭体系),储层温度低于临界温度,储层压力高于液化压力,二氧化碳和乙烷才可能以液态形式存在(图 1-2)。

上面所述临界温度和临界压力是对单一气体组分而言的。在自然条件下,煤层气通常是多种组分气体的混合物。混合气体的临界温度,高于其最低沸点组分的临界温度,低于最高沸点的临界温度,等于组成混合气体的各个组分的绝对临界温度与相应的分子浓度的乘积之和。

相应地,也可以计算出混合气体的临界压力。这种计算出来的叫混合气体的拟临界温度和拟临界压力。

5)煤层气在水中的溶解度

20℃、0.101325MPa 下单位体积水中溶解的气体体积称为溶解度(m^3/m^3),溶解度同气体压力的比值称为溶解系数 $[\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{atm})]$ 。煤层气能不同程度地溶解于煤储层的地下水中,不同的气体溶解度差别很大。甲烷溶解度随压力的增加而增加,低压时呈线性关系,高压时($>10\text{MPa}$)呈曲线关系(图 1-3)。甲烷溶解度随矿化度的增加而减少(图 1-4)。

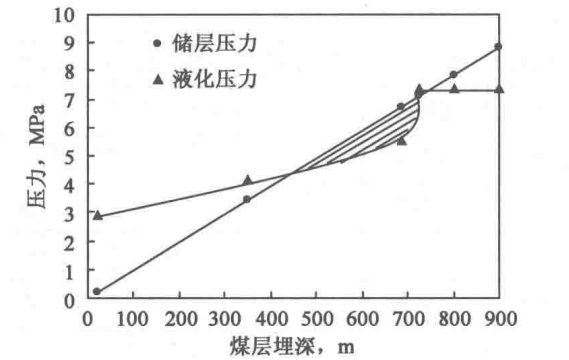


图 1-2 二氧化碳在正常地温条件下的液化区间

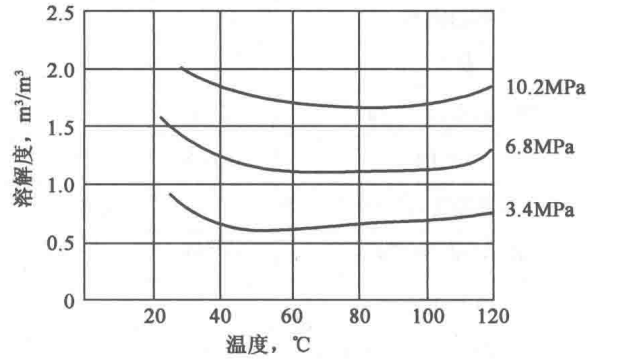


图 1-3 甲烷在水中的溶解度与温度的关系

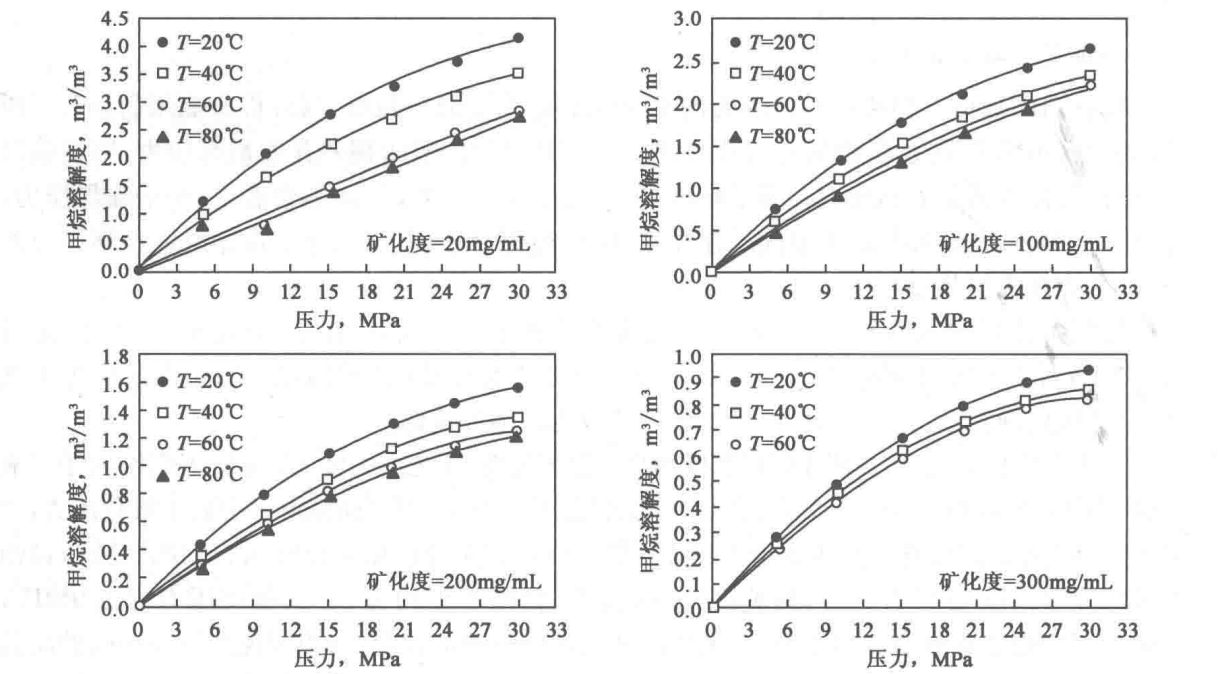


图 1-4 不同温度、不同矿化度条件下的甲烷溶解度与压力的关系

6)主要气体组分的性质

煤层气成分的物理性质见表 1-4。甲烷为无色、无味、无臭、无毒的气体。但煤储层中往往含有少量其他芳香族碳氢气体,因此常常伴着一些苹果的香味。在大气压 0.101325MPa, 温度 0℃ 的标准状态下,甲烷的相对分子质量为 16.043,密度为 $0.0667\text{kg}/\text{m}^3$,比空气密度小,