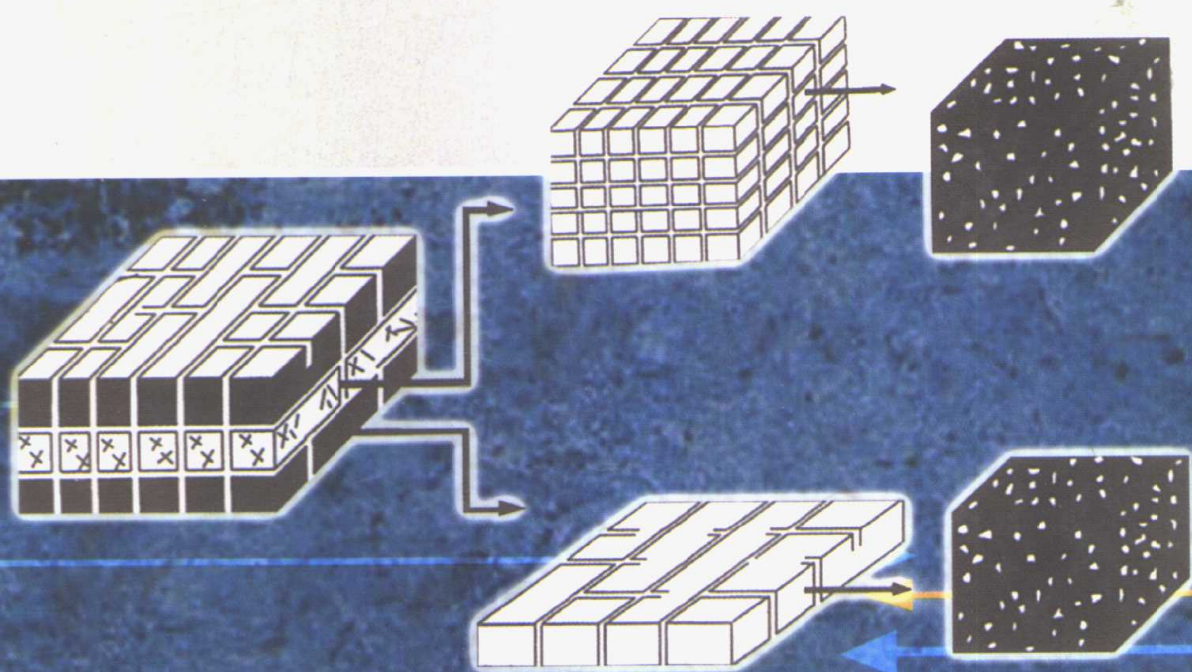


煤层气地质学 与勘探开发

苏现波 陈江峰 孙俊民 程昭斌 等 编著



科学出版社

P618.110.8
S-872

煤层气地质学与勘探开发

苏现波 陈江峰 孙俊民 程昭斌 等编著

焦作工学院重点学科基金资助

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书根据大量国内外煤层气生产与科研资料,结合作者近期的科研成果,从煤层气的成因、储层、赋存、储层数值模拟和综合地质评价等方面系统论述了煤层气地质学的基本理论和研究方法。同时对目前在煤层气勘探开发中常用的工艺技术进行了详细介绍,包括钻井、测井、完井、固井、试井、储层强化和开发等方面的理论基础和工艺;另外,简要介绍了目前仍处于探索阶段的一些工艺技术。

本书可供从事煤层气勘探开发的工程技术人员和科研人员,以及高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气地质学与勘探开发/苏现波等编著.-北京:科学出版社,2001
ISBN 7-03-008838-7

I.煤… II.苏… III.煤层气-气田开发 IV.TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 70662 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2001 年 2 月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—900 字数:319 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

序

我国煤层气资源丰富，根据中国煤田地质总局最近的调查结果，我国煤层气资源量居世界前列，开发利用前景广阔。“西气东输”工程的启动，反映了我国能源结构调整的趋势，煤层气的开发利用对能源结构的调整将起推动作用，同时，对改善煤矿生产安全和保护生态环境具有重要意义。

近年来，我国政府十分重视煤层气的勘探开发，确定了地面开发与井下抽放相结合，并以地面开发为主的发展战略，规划到 2010 年，力争使全国煤层气产量达到 100 亿立方米。目前，我国煤层气勘探开发已取得了一定成果，已施工的煤层气井达 140 多口，在一些地区成功获得了高产、稳产井，不久的将来有望在沁水盆地与鄂尔多斯盆地等达到产业规模，显示出潜在的商业化前景。

煤层气的开发，关键依靠科技进步。美国经过 20 多年的探索与实践，成功实现了煤层气的商业化生产并达到一定的产业规模，1995 年全美的煤层气产量与我国同年的天然气产量相当。我国煤层气的开发利用，不仅要充分消化吸收国外的成功经验，而且要结合我国煤田地质特点，大力攻关。随着我国煤层气勘探队伍日益壮大，需要一部系统反映这一新兴边缘学科的参考书。苏现波、陈江峰、孙俊民、程昭斌等通过多年勤奋努力完成的《煤层气地质学与勘探开发》一书，符合了当前的迫切需求。

该书由两部分组成：第一部分系统地介绍煤层气地质学的基本理论，包括煤层气的形成、储层、赋存、储层数值模拟和综合地质评价；第二部分阐述煤层气勘探开发的工艺技术，涉及钻井、测井、完井、固井、试井、储层强化和生产技术等。全书系统地总结了 20 多年来国内外煤层气勘探开发的理论与实践成果，深信这本书的出版对我国煤层气的勘探开发和深入研究会起到积极的推动作用。我十分欣慰地向大家推荐这部有价值的参考书，同时祝愿作者在今后的科学研究中取得更大的成就！

中国工程院院士

韩德馨

2000 年 3 月 26 日

前 言

煤层气是一种在煤化作用过程中形成的、并赋存在煤层中的以甲烷为主的混合气体，在煤矿称瓦斯。长期以来煤层气一直被作为煤矿生产的一种主要灾害对待，直到20世纪70年代美国在圣胡安和黑勇士盆地进行的煤层气地面开发试验的成功，才真正揭示了这一新型洁净能源的潜在经济效益和广阔前景。20余年来，从事煤层气的勘探开发与科研活动的国家和地区将近30个，只有美国实现了产业化，而且煤层气生产并主要集中在圣胡安与黑勇士两个盆地，澳大利亚在个别盆地也进入了试生产阶段。

煤层气的开发利用之所以备受各国政府和企业的重视，是由于具备下列三方面的意义：① 煤层气是一种新型洁净能源，其开发利用可弥补常规能源的不足。在美国1995年煤层气的年产量已突破150亿立方米，与我国同年常规天然气产量相当。据中国煤田地质总局研究，我国煤层气的资源量为11.34万亿立方米（煤层气含量大于 $4\text{ m}^3/\text{t}$ ，埋深2000 m以浅），居世界第二位，为煤层气的开发利用奠定了雄厚的物质基础。在我国无论是工业用气，还是民用气都有着广阔的市场。丰富的资源量与广阔的市场是煤层气开发的前提。② 减灾意义。长期以来煤层气一直是影响煤矿安全生产的主要灾害。瓦斯爆炸与突出不仅给企业带来了巨大经济损失，而且造成严重人员伤亡。煤层气的地面开发预抽出了赋存在煤层中的瓦斯，可有效地降低或杜绝煤矿生产过程中的瓦斯灾害。③ 环境意义。甲烷是大气中主要的温室气体之一，对红外线的吸收能力极强，其温室效应是二氧化碳的25~30倍。过去200~300年来大气中甲烷浓度已增加一倍。据估算大气中甲烷浓度每增加 1×10^{-6} ，可导致地球表面温度增加 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 。仅煤矿开采过程中，甲烷的排放量就占从所有化石燃料中排放出的甲烷量的一半。可见煤层气的井下抽放或地面开发利用可有效地降低温室效应。

我国的能源结构与发达国家相比天然气所占比例极低，在一定程度上制约了经济的发展。在世界能源结构中，石油占38%~40%，煤炭占25%~30%，天然气占20%~22%，而我国煤炭大致占75%，天然气占2%。“西气东输”工程的启动与煤炭限产预示着我国能源结构调整的趋势，这种调整必将对产业结构产生重大影响。

中国煤层气地面开发起步较晚，无论是煤层气地质学的基本理论还是勘探开发工艺，基本上是引进、消化、吸收国外的经验。能够反映中国煤层气地质特征的研究还需进一步深入。另外，中国煤层气的产业化关键是勘探开发技术。因为与美国相比，我国渗透性较好的煤层气储层分布有限，大部分地区为渗透性极差的储层，这类储层内赋存的煤层气是目前的工艺无法实现开发的，但中国煤层气的产业化必须突破这一禁区。因此，中国煤层气勘探开发的当务之急是：在煤层气储层详细描述的基础上，探讨适合我国煤层气储层特征的开发工艺。

作为一门新兴的边缘学科，煤层气地质学兼收并蓄了其它多门学科的理论和方法，经过20余年的生产与科研实践，积累了大量资料，逐渐形成了自身比较完善的理论体

系和适合于煤层气这种非常规能源的勘探开发工艺。也就是说，煤层气地质学已具备了一门独立学科应具备的三重性：理论性、方法性和实用性。煤层气地质学是一门研究煤层气的形成、赋存、运移和产出规律的学科，直接服务于煤层气的勘探开发。煤层气勘探开发工艺继承并发展了常规油气的工艺，形成了一套适合于煤层气储层特征的工艺体系。为此，笔者根据以往大量的资料和近些年来的科研成果，历时4年，编写了《煤层气地质学与勘探开发》一书，旨在系统总结国内外煤层气勘探开发与科研活动的理论与实践，推动我国煤层气早日产业化。

本书在编写过程中，尽可能利用最新的生产与科研资料，以及笔者近期的科研成果，使其内涵尽可能广。全书可区分为煤层气地质学与煤层气勘探开发两部分。煤层气地质学从基本理论、研究方法和实际应用等方面进行了系统论述，囊括了煤层气的成因、储层、赋存、储层数值模拟以及综合地质评价等内容；煤层气勘探开发主要介绍了目前常用的一些工艺技术，同时对于一些新型的、目前仍处于探索和试验阶段的工艺技术进行了简要论述，包括了钻井、测井、完井、固井、试井、储层强化以及生产技术等。

本书具体章节分工：前言、第二章、第三章、第九章，苏现波；第六章、第七章、第八章，陈江峰；第一章、第十一章，孙俊民；第五章、第十章，程昭斌；第四章，潘结南、刘保民。全书由苏现波统一审核、定稿。

本书在整个编写过程中始终得到了吴贤涛教授的指导；袁世鹰教授、邹友峰教授、焦留成教授、丁安民教授、王怡录教授给予了大力支持和指导；胡秀芳副编审对全书进行了校对和编审；汤友谊副教授、王有凯副教授、纪多辙副教授、张子敏教授、彭立世教授、袁崇孚教授对本书的编写提出了宝贵意见；研究生冯艳丽、王丽萍参与了资料收集、图件清绘工作，在此一并致以衷心感谢！笔者引用了大量国内外参考文献，借此机会对这些文献的作者表示感谢。

中国工程院院士韩德馨教授欣然为本书作序；任德贻教授审阅了全书的初稿，并提出了宝贵的修改意见。在此作者表示衷心的感谢！

本书的内容和编排若有不足之处，恳请读者予以指正。

目 录

序

前言

第一章 煤层气的成因及地球化学特征	1
第一节 煤的成烃机理	1
一、煤成烃的物质基础	1
二、煤的化学结构与双组分模式	2
三、煤化作用的化学过程	3
第二节 煤层气的成因	5
一、煤层气的成因类型	5
二、煤层气的储存与运移	8
第三节 煤层气的地球化学特征	9
一、煤层气的成分及同位素特征	9
二、煤层气地球化学特征的影响因素	12
三、煤层气对环境的影响.....	13
第二章 煤层气储集层	15
第一节 储集层的孔隙与裂隙特征	16
一、基质孔隙	17
二、煤的裂隙特征	22
三、煤层气储层几何模型.....	30
第二节 储层的渗透性	31
一、基本概念	31
二、渗透率的影响因素	32
三、渗透率参数的获得	36
第三节 储层的其它性质	37
一、原应力、井底压力和储层压力	37
二、储层温度	37
三、储层的力学性质	37
第四节 储集层的分级与分类	38
一、分级	38
二、分类	38
三、储层评价与有利区块选择	40
第五节 煤层气的封存机制	40
一、封存机理	40
二、影响盖层有效性的因素	41

第三章 储层中的流体	43
第一节 储层内流体的性质	43
一、储层内流体的粘度	43
二、流体地层体积系数	44
三、流体的饱和度	44
第二节 储层内的气体——煤层气的赋存状态	45
一、溶解态	45
二、游离态	46
三、吸附态	47
第三节 含气量及其控制因素	54
一、含气量的构成	54
二、含气量的测试方法	55
三、含气量的表达基准	59
四、吸附时间	60
五、解吸速率	61
六、含气量的控制因素	61
第四节 煤层气的运移和产出机制	63
一、煤层气的运移机制	63
二、煤层气的产出机制	65
第四章 储层数值模拟	66
第一节 概述	66
第二节 储层模拟模型综述	68
一、国外有关模型综述	68
二、中国煤层气运移研究现状	78
第三节 流体-固体耦合模型	80
一、基本思路	80
二、流体-固体耦合模型	81
第五章 煤层气综合地质评价	84
第一节 煤层气地质评价的主要内容	84
一、地质背景	84
二、煤的资源量计算	85
三、煤层气资源量计算	86
四、储层描述	92
第二节 区域地质评价的内容和原则	93
一、区域地质评价的内容	93
二、区域评价原则和标准	93
第三节 勘探阶段地质评价	94
第四节 初期开发试验阶段地质评价	95
第六章 钻井	97

第一节	概述	97
第二节	确定井类	98
第三节	钻井设计	99
	一、钻井设计前的资料准备和地层评价	99
	二、钻井设计	100
第四节	钻井	104
	一、钻井设备的选择	104
	二、钻井液的选择	105
	三、钻井钻进	106
第五节	取心	107
	一、煤层气井的取心目的及要求	107
	二、煤层气井的取心方法与取心技术	107
第六节	钻井过程对储层的伤害问题	111
	一、钻井液对储层的伤害	111
	二、钻井压力对储层的伤害	112
	三、降低储层伤害应采取的措施	113
第七章	测井	114
第一节	测井方法及其对煤的响应	116
	一、电阻率测井	116
	二、自然电位测井	118
	三、自然伽马测井	118
	四、密度测井(伽马伽马测井)	119
	五、声波测井和中子测井	120
	六、自然伽马射线能谱测井和诱导伽马射线能谱测井	121
	七、地球化学测井和碳/氧测井	121
第二节	裸眼井、下套管井和生产井的测井组合选择	122
	一、裸眼井测井方法	122
	二、下套管井测井方法	123
	三、生产井测井方法	123
第三节	从测井资料获得的储层特性	124
	一、煤层厚度	124
	二、煤的工业分析	125
	三、含气量	126
	四、吸附等温线	127
	五、渗透率	128
第四节	测井资料的计算机模拟	130
第八章	完井与固井	134
第一节	完井目的	134
第二节	完井方法	134

一、裸眼完井	135
二、套管完井	136
三、套管-裸眼完井	137
第三节 套管固井	138
第四节 地层进入	139
一、地层进入方法	140
二、地层进入方法的选择	143
第五节 完井方法选择	144
第九章 试井分析的原理和方法	149
第一节 概述	149
第二节 试井的基本原理	150
一、压力不稳定渗流理论	150
二、连续方程的解	151
三、井筒污染	153
四、井筒储存效应	153
五、多相流总淌度、储存系数与总流动速率	154
六、多相流条件下有关公式的变化	155
第三节 钻杆测试 (DST)	156
一、钻杆测试过程	156
二、钻杆测试设计	157
三、钻杆测试试井分析	158
四、钻杆测试用于煤层气井的局限性	159
第四节 段塞试井	159
一、概述	159
二、段塞测试设计	160
三、段塞试井分析	161
四、改进的段塞试井分析方法	162
第五节 注水-压降试井	166
一、注水-压降试井设计	166
二、试井分析	166
三、垂直裂缝分析	168
第六节 干扰试井	169
一、干扰试井设计	169
二、试井分析	169
第七节 压力恢复试井	170
第十章 煤层气储层强化	171
第一节 裸眼洞穴法完井	171
一、概述	171
二、裸眼洞穴法完井工艺	171

三、储层强化机制	173
四、裂隙扰动的控制因素	176
五、裸眼洞穴法完井数值模拟	177
第二节 煤层压裂	178
一、概述	178
二、水力压裂模型	179
三、小型压裂	186
四、压裂设计	188
五、实施压裂	190
六、压裂效果评价	191
第三节 特殊强化工艺	192
一、顶板强化	192
二、酸化处理	194
第十一章 煤层气生产技术	195
第一节 煤层气生产的特点	195
一、煤层气的地下运移	195
二、产气量的变化规律	195
三、煤层气生产工艺特点	196
第二节 排采方法	197
一、梁式泵	197
二、螺杆泵	198
三、气举	199
四、电潜水泵	200
第三节 气水地面集输与处理	200
一、地面气水分离	200
二、集输系统	201
三、流体计量系统	202
四、气体处理与压缩	203
第四节 生产优化与储层管理	207
一、产前准备	207
二、检修	208
三、减少故障的方法	208
四、生产管理	209
参考文献	210

第一章 煤层气的成因及地球化学特征

煤是成分与结构十分复杂的固体化石燃料，也是烃类气体的源岩和储集层。在成煤作用的泥炭化作用阶段和变质作用阶段以及后期煤层抬升阶段，在微生物或热力作用下，伴随煤（或泥炭）成分与结构的变化，都有烃类气体的形成。而不同阶段、不同成因类型的烃类气体具有不同的成分与同位素特征。现今保留在煤层中的气体是经过运移和聚集的各种成因类型气体混合的产物，其成分和同位素组成既不同于常规油气，也不同于煤成气。这种独特的地球化学特征是各种原生因素和次生因素叠加作用的结果。

第一节 煤的成烃机理

一、煤成烃的物质基础

地质体中的有机物来源于各种生物有机质，为化石燃料提供母源有机质的生物，主要是各种细菌、真菌、浮游生物和高等植物。尽管它们的种类与生活环境各异，但其细胞中的原生质都主要是由 C、H、O、N 等少数几种元素组成。根据化学结构，可将不同来源的有机质分为五类：① 蛋白质；② 糖类（碳水化合物）；③ 脂类化合物；④ 木质素；⑤ 核酸、色素及少量其它有机化合物。蛋白质和脂类化合物贫 O 富 H，而木质素和碳水化合物相对富 O 贫 H，见表 1.1。

表 1.1 各种有机质的化学组成 (wt%)^[1]

有机质	C	O	H
蛋白质	51	22	7
脂类化合物	69	18	10
碳水化合物	44	49	6
木质素	53	27	5
石油	79~89	—	9~15
泥炭	50~65	25~28	6~7
煤	65~91	2~28	4~6

在煤炭资源中占绝对优势的腐植煤，来源于木质纤维素为支撑组织的陆生植物。木质纤维素在弱氧化-还原条件下经凝胶化作用形成凝胶化物质；而在氧化条件下经丝炭化作用形成丝炭化物质。在煤化作用过程中，前者转化为镜质组，后者转化为丝质组。高等植物中所含少量的角质、孢子、木栓质和树脂等稳定组分，主要由富 H 的蛋白质和脂类化合物组成，它们是煤中稳定组分的前身。镜质组、惰质组与稳定组按不同比例

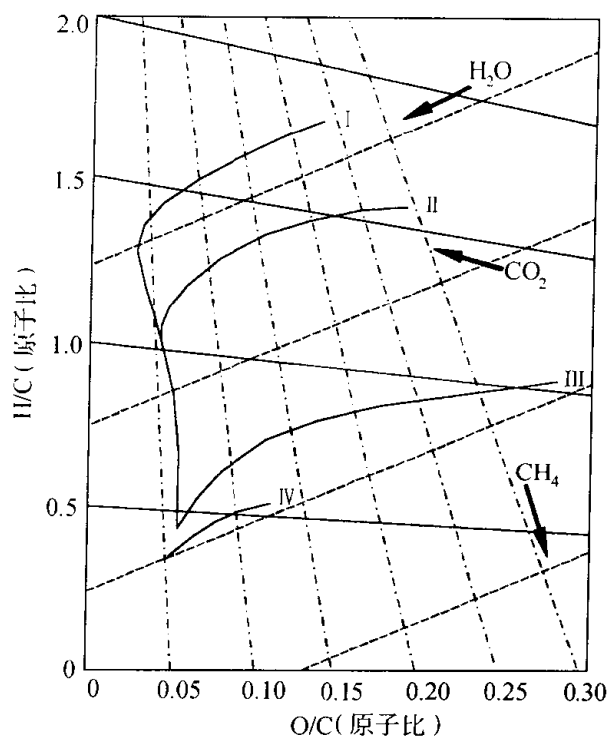


图 1.1 干酪根类型及演化路径
Van Krevelen 图解^[2]

组合，就构成了不同类型的腐植煤。

有机质被埋藏后，在不断增加的温度和压力作用下，大量富 H、O 的挥发组分如 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 等被脱除，而 C 得以富集。图 1.1 表明了不同类型干酪根在演化过程中产生 CH_4 ，排出 CO_2 和 H_2O 的趋向。图中四种干酪根类型是通过元素分析予以确认的，并与三个显微煤岩组分相对应：富稳定组分煤通常对应于 I 型和 II 型干酪根，富镜质组分煤对应于 III 型干酪根，富惰性组分煤对应于 IV 型干酪根。

一般说来，I 型和 II 型干酪根主要来源于水生低等浮游生物的残体，富含烷族结构，是成油的有机质。而 III 型和 IV 型干酪根富含芳香结构，是成气的有机质。腐植煤的主要组成部分是镜质组，以生气为主，但其中稳定组分及富氢镜质体都具有产生液态烃的能力。

二、煤的化学结构与双组分模式

1. 煤的化学结构

煤化学结构的研究对了解煤的成烃机制具有非常重要的意义。通常认为，煤是由带有官能团（如 $-\text{OH}$ ， $=\text{C}=\text{O}$ ， $-\text{COOH}$ ， $-\text{OCH}_3$ ）和侧链（胺、大分子烃）的缩合芳香核为骨架的结构单元以网状桥键相连而组成的三维空间结构的大分子化合物，其结构参数包括：缩合芳香环数、芳香度、官能团分布、碳氢和杂原子分布及桥键等。

20 世纪 80 年代以来，随着现代分析测试技术的发展，人们对煤化学结构的研究逐步深入。借助于不同演化程度煤的系列结构参数，有可能定量或半定量地描述煤的结构及其演化过程中的变化。目前取得主要进展如下^[3]：① 热解试验 GC/MS 表明，中煤级阶段镜质组大分子结构的变化主要从烷基酚结构（亚烟煤）向烷基苯和萘结构转化；② Van Krevelen 认为，在烟煤阶段每个结构单元平均芳香环数为 4~5，而最近研究表明为 1~1.5 个，且在烟煤阶段，芳香环数增加很慢，直至半无烟煤—无烟煤阶段，才突然迅速增加；③ 在烟煤阶段，煤化学结构中范德华力和氢键比共价键更重要。以 Van Krevelen 为代表的煤化学结构的观点过分注重有机大分子主体结构中共价键的作用，而忽视了煤结构中氢键和范德华力的重要性。

2. 煤组成的双组分模式

煤是具有分子筛结构的微孔状固体，其内部微孔隙中充满了煤化作用过程中形成的气、液态流动相。因此，从广义上讲，煤应是固体相和流动相的组合。近来，人们已认

识到流动相主要为分散的“小分子”物质，包括烃类及内在水分。这些小分子物质呈吸附状态存在于煤基质的微—大孔隙表面。尽管目前对煤的大分子格架与小分子化合物的化学构成、数量关系、存在状态、作用方式等缺乏全面的认识，然而煤的两相结构观点已得到多数学者的认同。

从烃的源岩和储层角度出发，可将煤的组成按图 1.2 的方案进行划分^[4]。这里，将有机质分为基质部分与小分子部分，前者指复杂的三维空间碳芳香格架，后者指以物理吸附或弱键与煤结构相连的小分子部分，此处使用“小分子部分”而非“流动相”，旨在避免与核磁共振分析中流动相的概念（指分子结构中具有高度振动或旋转流动性的组分）相混淆。小分子部分又可进一步分为强键结合部分和松散结合部分，前者不能在煤结构中自由运动，后者能自由进出煤结构，主要为 CH₄、CO₂ 和 H₂O 等，其中 CH₄ 是煤层气的主要成分。

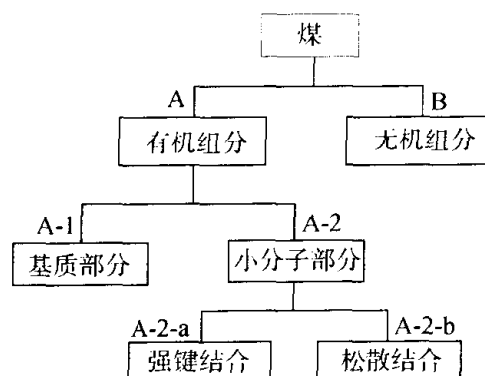


图 1.2 煤组成的双组分模式图

组分描述：煤——主要由有机组分构成的沉积岩；B——主要为粘土矿物、石英、方解石、黄铁矿及其它物质，包括粘土矿物的结合水（—OH）及层间水；A-1——由桥键相连的单个或多个带有含 H 或 O 官能团的芳香环结构；A-2-a——中到高分子的油和沥青，包括芳香的、脂肪的和杂原子；A-2-b——主要为 CH₄、CO₂、H₂O 及 N₂、C₂H₆ 等小分子，其富集程度取决于煤级、环境条件和煤化作用历史

在将煤作为烃的源岩与储集层进行研究时，煤组成的双组分模式具有重要实用

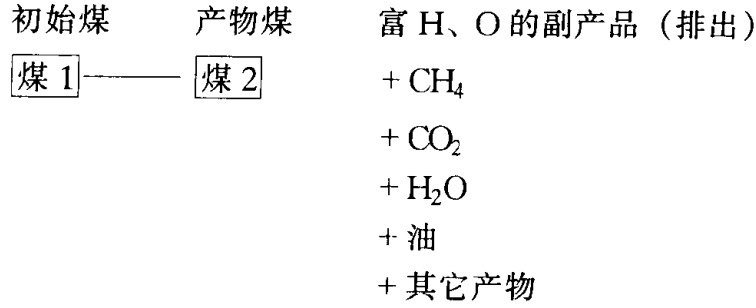
价值。但值得提出的是，无论大分子基质还是小分子部分，在煤化作用过程中其成分都在发生变化。例如，小分子部分在低煤级时主要是水；在中煤阶段时，主要是油和沥青；而在高煤级时，则主要为 CH₄ 和 H₂O。但现今保留在煤结构里的是它们的混合物。此外，鉴于煤化学结构的复杂性，这种分类在一定程度上是模式化的。事实上，煤结构中从小分子（如 CH₄ 和 H₂O）到大分子基质是连续变化的。

综上所述，煤不仅具有成烃的物质基础，而且具有容纳烃类物质的空间。然而，煤能否成为好的源岩和储集层，则主要取决于煤化作用程度，煤化作用过程中物理性质的变化（孔隙率、渗透性）影响烃类气体的赋存和运移，而烃类气体的产生则取决于煤化作用过程中的化学反应。

三、煤化作用的化学过程

煤化作用的实质是温度升高条件下的化学反应过程，烃类即为反应的产物。由图 1.3 可知，所有类型的煤，在演化过程中均表现为 C 含量增加，而 H、O 含量减少。低煤级以 O 的减少为主，而高煤级 H 含量迅速降低；不同类型的煤，其 C、H、O 重量百分比变化幅度不同，但到高煤级各种煤趋于一致，表明多余的 H、O 已脱除，成分趋于稳定。

C 含量增加的过程，也就是富 H、O 物质的形成与排出过程。这个过程包含了键的断裂与重组，键断裂后形成的自由基团，最终形成自由分子。煤化作用过程可用下式表示：



从泥炭经褐煤、烟煤到无烟煤，其分子组成的变化如下：

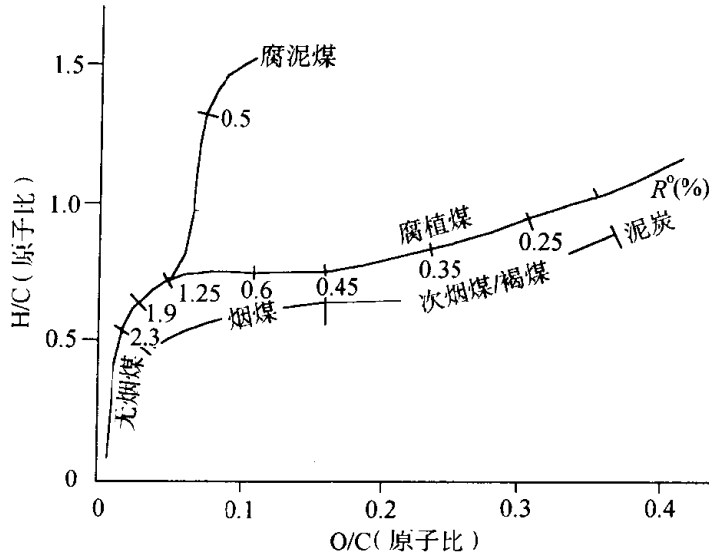
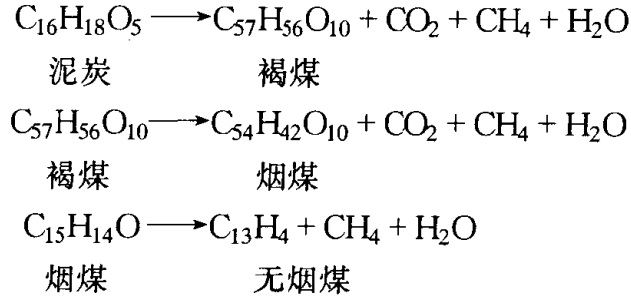
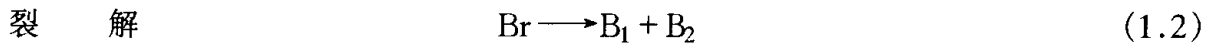
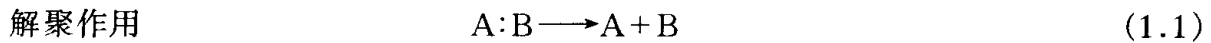


图 1.3 两种不同类型煤演化过程中成分的变化^[4]

上述反应所形成副产物的成分一方面随煤级而变化，低煤级主要为 H₂O，中煤级以 CO₂ 为主，高煤级则以烃类为主；另一方面受有机质类型（显微煤岩组成）的影响，富 H 镜质体与稳定组分在低—中煤级具有产出大量富 H 产物的能力。

上述反应式可以说明煤的元素组成的变化，但不能描述煤结构中小分子部分的演化、圈闭及后来的破坏过程，也不能说明富 C 基质部分的结构变化过程。这些变化可通过以下几个反应式说明：



A 表示富 C 的芳香结构基质部分，B 表示富 H 或 O 的小分子部分。解聚作用是指大分子基质裂解为两个小分子，包括小分子官能团的脱除及桥键断裂；裂解指“圈闭”

的小分子被裂解成更小的分子；而聚合作用则是指有机分子通过共价键结合为大分子的反应。

上述前三个反应式表示体系内分子结构的重组过程，并未导致煤元素组成的改变，而(1.4)式可反映出随煤级增加元素成分的变化，由(1.1)、(1.2)、(1.3)式形成的Be部分从煤中逸出，Br封存其内。因Be富H和O，它的逸出导致了C含量的增加。

上述反应过程通常按一定顺序进行，据Larsen等的研究表明^[5]：在低—中煤级阶段，煤化作用以解聚反应为主，键的断裂优势大于聚合作用，而解聚作用的中间产物后来可被裂解破坏或重新聚合。

煤的元素分析可反映A+Br的组成，在沥青化作用阶段，Br部分较多，而在去沥青化作用阶段，则Be部分较多。但不管怎样，现场和实验证实H/C及O/C的连续降低，表明排驱过程贯穿于煤化作用的始终。

虽然所有类型有机质的热演化都可用反应式(1.1)至(1.3)描述，但不同类型有机质其反应时间与产物不同。例如丝质体和半丝质体多形成于泥炭沼泽环境，因火焚或生物的催化形成，伴随此过程有挥发分如CO₂、CH₄的逸出。而稳定组和镜质组直到无烟煤阶段，由脱挥发分作用引起的C的富集与芳香度的提高却与泥炭化阶段的丝质体相当。

第二节 煤层气的成因

一、煤层气的成因类型

煤层气有两种基本成因类型：生物成因和热成因。生物成因气是由各类微生物的一系列复杂作用过程导致有机质发生降解而形成的；而热成因气是指随着煤化作用的进行，伴随温度升高、煤分子结构与成分的变化而形成的烃类气体。生物成因气可形成于煤化作用早期阶段（泥炭—褐煤）以及煤层形成以后的构造抬升阶段，因此又可分为早期（原生）生物成因气与晚期（次生）生物成因气。

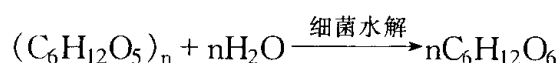
1. 早期生物成因气

早期生物成因气形成于泥炭—褐煤阶段（R^o<0.5%），由于埋藏浅（<400m）、温度低，热力作用尚不足以使有机质结构变化产生气体。在此阶段，有机质成分与结构的变化主要通过各类微生物参与下的生物化学反应实现。以CH₄为主要成分的生物成因气，主要是在泥炭沼泽环境中通过微生物对有机质的分解作用而形成。依其所利用的C源，生物气的形成途径可分为两种：①CO₂还原生成CH₄；②醋酸、甲醇和甲胺等发酵转化成CH₄^[6]。

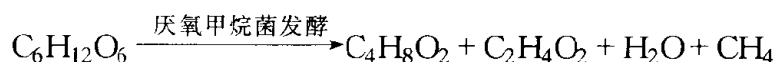
生物气的形成过程包括一系列复杂的生物化学作用，这个过程的实质是通过微生物的作用，使复杂的不溶有机质在酶的作用下发酵变为可溶有机质，可溶有机质在产酸菌和产氢菌的作用下，变为挥发性有机酸、H₂和CO₂；H₂和CO₂在甲烷菌作用下最后生成CH₄。因此生物成因气实质上是微生物成因气，亦称细菌气。

泥炭沼泽表层为氧化条件，当被上覆更多的植物碎屑沉积物不断埋深后，就转为还

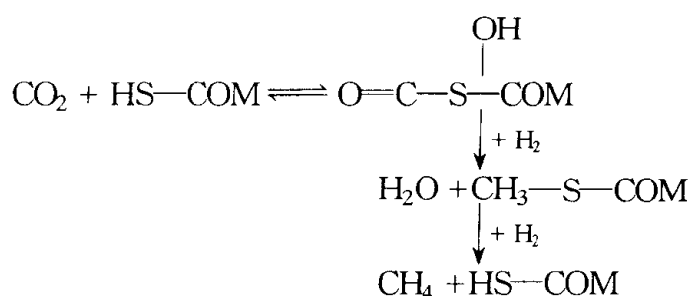
原环境。虽然生物气主要形成于还原层，但表层有机质的分解产物可为厌氧环境下的分解提供物质基础，例如：需氧性细菌通过纤维素酶和催化作用可把纤维素水解为单糖类：



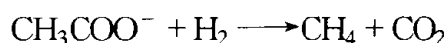
当转变为还原环境时，单糖在还原菌参与下发酵可生成脂肪酸（丁酸和乙酸）：



甲烷菌通过辅酶 M ($HSCH_2CH_2SO_3^-$ ，简写为 $HS-COM$) 活化 CO_2 和 H_2 (CO_2 亦可来自脱羧作用)，并使之形成甲基，最后还原为 CH_4 。



甲烷菌使乙酸还原为 CH_4 的过程，可概括为：



在厌氧环境中 CO_2 、乙酸主要来自于富氧的碳水化合物，少部分来自于蛋白质，在高等植物中主要是纤维素、半纤维素、糖类、淀粉和果胶等有机化合物。

在现代泥炭沼泽环境中，通过 CO_2 还原或甲基发酵都可形成生物气，但根据气体化学成分和同位素组成分析，大部分古代的生物气是通过 CO_2 还原产生的。虽然近地表处新鲜沉积物可通过上述两条途径形成气体，但可能散失到大气中而保存甚少，而深处的沉积物则主要通过 CO_2 还原形成生物气，其保存条件优于前者。这是因为随着埋藏深度的增加，已分解的木质素和纤维素形成腐殖酸的同时，都不断通过脱羧作用，使侧链上的亲水官能团和羟基、羧基、甲氧基、羰基等不断分裂减少，尤其是羟基在褐煤早期阶段明显减少，缩合成更大的腐殖酸，伴随羟基的脱除，形成大量 CO_2 ，而甲基发酵的 C 源主要在埋藏较浅处的泥炭化作用阶段形成。

由前述可知，生物气的形成应满足两个条件：① 要有丰富的有机质提供产气的物质基础；② 具备有利于甲烷菌繁殖的环境条件。研究表明^[7]：在厌氧环境、低 SO_4^{2-} 、低温（通常在 50°C 以下）、高 pH 值、丰富的有机质、适宜的孔隙空间和快速沉积等条件下，生物气会大量形成。但由于埋藏浅，原生生物气在煤层中保存甚少，不是煤层气的主要勘探对象。

2. 次生生物成因气

在煤层后期抬升阶段，煤层中温度等环境条件又适宜微生物生存。这些微生物主要通过位于补给区的煤层露头由大气降水带入，在相对低温条件下 (56°C) 代谢湿气、正烷烃和其它有机化合物，生成 CH_4 和 CO_2 。在含煤盆地中，次生生物作用过程活跃并影响气体成分的深度间隔称作蚀变带，一般位于盆地边缘或中浅部；不发生蚀变的气体