

中 国

非常规油气地质

关德师 牛嘉玉 郭丽娜 许化政 著

石油工业出版社

京)

9.2

| | |
|-----|------------|
| 登录号 | 199120 |
| 分类号 | P618.130.2 |
| 册次号 | 289 |

号 880 字登编(京)

中国非常规油气地质

本书系统论述了中国非常规油气地质学的发展概况、基本理论、勘探评价及开发技术。全书共分五章：第一章绪论，第二章非常规油气的地质学概念及分类，第三章非常规油气的地质学特征，第四章非常规油气的勘探评价，第五章非常规油气的开发技术。本书可作为石油地质学、油气地质学、非常规油气地质学等专业的教材，也可供从事非常规油气地质学工作的工程技术人员参考。

关德师 牛嘉玉 郭丽娜 许化政 著

图在书目(CIP)编

中国非常规油气地质学
北京石油工业出版社, 1992.6
ISBN 7-5021-1360-X



石油工业出版社
北京石油工业出版社
北京石油工业出版社



石油工业出版社
1992年9月北京第1版第1次印刷
787×1092毫米

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书是中国第一部论述非常规油气地质的专著,分三部分。第一部分,非常规天然气,包括煤层甲烷、致密砂岩天然气、水溶气、甲烷水合物和页(泥)岩气,主要就各类天然气的形成、组成特征、富集因素、成藏规律等进行了系统的研究;第二部分,重油沥青,对重油沥青的物化性质、稠变特征、成因与聚集机制、油藏圈闭等方面作了全面的论述;第三部分,油页岩资源,涉及油页岩的有机岩石学、有机地球化学、化学和油页岩的地质特征与资源特征。各部分还对中国的该类资源的分布特征、资源量等进行了评估。该书不仅在理论上意义重大,而且对指导中国油气勘探亦具重要参考价值。

本书可供从事石油、天然气及煤炭勘探开发的地质、科研工作者,以及大、中专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国非常规油气地质/关德师等著

北京:石油工业出版社,1995.6

ISBN 7-5021-1260-X

I. 中…

II. 关…

III. 油气田-油气藏-资源-中国

IV. P618.13

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门安华里二区一号楼)

西南石油学院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 18 $\frac{1}{2}$ 印张 470 千字 印 1-1000

1995 年 9 月北京第 1 版 1995 年 9 月第 1 次印刷

定价:15.80 元

前言

从人类社会发展的总趋势来看,社会对能源的依赖性会越来越大,且需求量亦愈来愈多。石油和天然气不仅是重要的能源,而且是重要的化工原料。其产量大小会给一个国家乃至世界的工业发展产生巨大影响,同时可能波及政治、军事、经济及人民生活等诸多领域。然而,石油天然气这种不可再生资源其资源量正在逐步减少,这就迫使人们不得不把发展石油天然气工业的着眼点放在未来。就石油天然气勘探开发历史而言,从以前直至现在,主要目标是以常规油气资源为主,这对中国来说更是如此。从长远利益出发,在继续勘探和开发常规油气资源的同时,开始重视资源潜力巨大的非常规油气资源,看来是一种不可避免的发展趋势了。

据预测,2020年以后,中国的常规石油资源最终可采量已采出过半,产量高峰期已过,而需求量将不断增加,故此必须及早研究新的替代能源。尽管其它能源(如核能)将会有所发展,但非常规油气资源毕竟较其它能源容易开发且成本较低,况且有机碳氢化合物(油气)作为动力燃料和化工原料的独特优点则是其它物质所不能替代的。

非常规油气资源系指目前技术条件下,无法采用常规方法进行勘探开发的那部分油气资源,主要包括(煤层甲烷、致密砂岩天然气、水溶气、甲烷水合物、页(泥)岩气、重油沥青和油页岩。)值得一提的是,随着勘探开发技术水平的提高,某些非常规油气可能被人们视为常规油气。

为了祖国的未来,为了中国石油天然气工业的发展,应该就中国非常规油气资源进行系统的研究。本书分非常规天然气资源、重油沥青资源和油页岩资源三大部分。非常规天然气分别对煤层甲烷、致密砂岩天然气、水溶气、甲烷水合物和页(泥)岩气的形成、富集因素、成藏规律等进行了分析,同时评估得出中国非常规天然气资源量可达 $95 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。中国重油沥青的研究始于80年代初,目前已形成了一定规模的生产能力,我们不仅讨论了重油沥青的物理、化学性质及其相互关系,同时对重油沥青的地化特征、稠变系列、成因与聚集机制进行了分析,另外,还就重质油藏的圈闭及我国各主要重油沥青分布区的地质特征作了系统的总结。油页岩资源部分由油页岩有机岩石学、有机地球化学、化学、含油页岩地层与矿床、地质特征与资源分布和资源开发展望等组成。依次讨论了油页岩的宏观与显微特征,油页岩的元素组成,红外光谱、生物标志化合物、有机质类型、成熟度、生烃潜力和生烃类型;油页岩灰分产率、灰分成分、品位、化学结构和工业一成因类型分类方案;含油页岩地层时代分布、地区分布和代表性矿床(点);油页岩剖面类型、沉积环境、盆地类型和资源分布;以及在油页岩炼油化工、燃烧发电和建材原料方面进行加工工艺、技术设备的革新,在开辟油页岩新的工业利用途径方面的进展。

本书由关德师、牛嘉玉、郭丽娜、许化政合作完成，具体执笔分工是：前言和第一部分非常规天然气资源——关德师、许化政；第二部分重油沥青资源——牛嘉玉；第三部分油页岩资源——郭丽娜。全书编写由关德师安排并统编。

本书在写作过程中得到了石宝珩、戚厚发、戴金星、程坤芳等的大力支持和帮助。尤其是石宝珩高级工程师，不仅从技术上关心此书的编写，同时在其它方面亦提供了许多支持，他这种关心中青年科技工作者的责任心和爱心，我们将铭记在心。戚厚发高级工程师曾审阅第一部分，并提出许多建设性的修改意见；第二部分在编写过程中，得到了各油田及北京石油勘探开发科学研究院有关同志的大力支持和帮助，尤其是北京石油勘探开发科学研究院的胡见义、谯汉生、徐树宝和李晋超高级工程师等，以及中国石油天然气总公司国际公司童晓光高级工程师多年来的悉心指导；我们在编写过程中曾参阅了大量的文献资料，并在本书中引入了部分成果，我们在这里深表敬意和谢意；刘峰先生不辞劳苦地给我们植字、初校；对这些我们在此深表谢意！我们还得感谢我们的夫人（或先生）王玲红、李晓红、刘峰、罗宝智，我们工作的完成与她（他）们的支持是分不开的。

目 录

前言

| | |
|--|------|
| 第一部分 非常规天然气 | (1) |
| 第一章 煤层甲烷 | (3) |
| 第一节 煤层成烃概论 | (4) |
| 一、煤的地球化学特征概述 | (4) |
| 二、煤成烃的模拟实验 | (6) |
| 三、煤在不同演化阶段的产气率 | (11) |
| 第二节 煤层甲烷的组成 | (12) |
| 一、煤层甲烷的组分特征 | (12) |
| 二、煤层甲烷的碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)特征 | (15) |
| 三、关于煤层甲烷组成特征的讨论 | (15) |
| 第三节 煤层甲烷的储集层 | (18) |
| 一、煤的孔隙类型 | (18) |
| 二、煤的储集性能 | (19) |
| 第四节 煤层甲烷的赋存状态及产出机理 | (37) |
| 一、煤层甲烷的赋存状态 | (37) |
| 二、煤层甲烷的产出机理 | (40) |
| 第五节 煤层甲烷的富集 | (42) |
| 一、煤层甲烷的运移 | (43) |
| 二、影响煤层甲烷富集的地质因素 | (45) |
| 第六节 中国煤层的分布与煤层甲烷的资源前景 | (57) |
| 一、聚煤作用及煤层 | (57) |
| 二、中国煤层甲烷资源前景 | (69) |
| 第二章 致密砂岩天然气 | (75) |
| 第一节 致密砂岩气藏特征 | (75) |
| 一、概况 | (75) |
| 二、致密砂岩气藏特征 | (76) |
| 第二节 中国典型致密砂岩气藏 | (82) |
| 一、孝泉气藏 | (82) |
| 二、白庙气藏 | (85) |
| 三、李屯气藏 | (87) |
| 四、户部寨气藏 | (90) |
| 第三节 致密砂岩气藏勘探 | (92) |
| 一、低渗致密气层特征及损害途径 | (92) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 二、控制气层污染的方法和途径 | (93) |
| 三、低渗一致密气层的增产措施 | (95) |
| 四、努力发展致密砂岩气藏勘探技术 | (98) |
| 第四节 中国致密砂岩气勘探前景预测 | (101) |
| 一、致密砂岩含气层系评价 | (101) |
| 二、致密砂岩气勘探现状及远景评价 | (102) |
| 三、致密砂岩气发展对策 | (102) |
| 第三章 其它非常规天然气 | (104) |
| 第一节 水溶气 | (104) |
| 一、水溶性天然气及水溶气藏 | (105) |
| 二、天然气在地层水中的溶解度 | (106) |
| 三、水溶气藏的分布及勘探开发特点 | (109) |
| 四、中国水溶气资源前景 | (111) |
| 第二节 甲烷水合物 | (113) |
| 一、大陆型水合物气藏 | (114) |
| 二、海洋型水合物气藏 | (115) |
| 第三节 页(泥)岩气 | (116) |
| 一、页(泥)岩气藏特点 | (116) |
| 二、泥页岩气的资源潜力及勘探前景 | (119) |
| 参考文献 | (121) |
| 第二部分 重油沥青资源 | (125) |
| 第一章 重油沥青的物理、化学性质与稠变特征 | (126) |
| 第一节 重油沥青物理与化学性质间的相互关系 | (126) |
| 第二节 重油沥青地球化学特征 | (127) |
| 第三节 稠变系列 | (132) |
| 第二章 重油沥青成因与聚集机制 | (135) |
| 第一节 重油沥青的次生性 | (135) |
| 第二节 稠变作用因素与阶段 | (135) |
| 第三节 重油沥青的聚集机制 | (136) |
| 第三章 重质油藏的圈闭类型与分布 | (140) |
| 第一节 圈闭类型 | (140) |
| 第二节 各类的分布特征 | (142) |
| 第四章 各区重油沥青资源的地质特征 | (146) |
| 第一节 松辽盆地 | (146) |
| 一、概况 | (146) |
| 二、重质油藏的地质特征 | (146) |
| 三、重油分布特征 | (152) |
| 第二节 二连盆地 | (153) |
| 一、概况 | (153) |

| | | |
|-------|------------------------|-------|
| (139) | 二、重质油藏的地质特征 | (154) |
| (139) | 三、重油分布特征 | (158) |
| (139) | 第三节 渤海湾盆地 | (158) |
| (139) | 一、概况 | (158) |
| (139) | 二、各坳陷重油沥青资源的特征 | (159) |
| (139) | 第四节 南阳盆地 | (193) |
| (139) | 一、概况 | (193) |
| (139) | 二、重质油藏的地质特征 | (193) |
| (139) | 三、重油分布与形成条件 | (196) |
| (139) | 第五节 苏北盆地 | (197) |
| (139) | 一、概况 | (197) |
| (139) | 二、重质油藏的地质特征 | (197) |
| (139) | 第六节 江汉盆地 | (199) |
| (139) | 一、概况 | (199) |
| (139) | 二、各区重质油藏的地质特征 | (199) |
| (139) | 三、分布特征 | (202) |
| (139) | 第七节 四川盆地 | (203) |
| (139) | 一、概况 | (203) |
| (139) | 二、重油沥青的形成条件与分布 | (203) |
| (139) | 三、重质油藏和沥青脉的地质特征 | (204) |
| (139) | 第八节 南方沥青矿概述 | (205) |
| (139) | 第九节 珠江口盆地流花 11-1 重质油田 | (206) |
| (139) | 第十节 准噶尔盆地 | (207) |
| (139) | 一、概况 | (207) |
| (139) | 二、盆地西北缘重油沥青资源特征 | (208) |
| (139) | 三、盆地东部的重油沥青资源特征 | (214) |
| (139) | 第五章 盆地类型与重油沥青资源 | (218) |
| (139) | 第一节 大地构造特征 | (218) |
| (139) | 第二节 重油沥青资源的形成条件 | (218) |
| (139) | 第三节 各类盆地的重油沥青资源 | (222) |
| (139) | 第四节 中国重油沥青资源前景 | (225) |
| (139) | 参考文献 | (227) |
| (139) | 第三部分 油页岩资源 | (228) |
| (139) | 第一章 油页岩有机岩石学 | (229) |
| (139) | 第一节 油页岩的宏观特征 | (229) |
| (139) | 第二节 油页岩显微组分组成 | (229) |
| (139) | 第三节 油页岩有机显微组分特征 | (232) |
| (139) | 一、镜质组 | (232) |
| (139) | 二、壳质组 | (233) |

| | | |
|-------|------------------------------|-------|
| (181) | 三、藻类组 | (233) |
| (181) | 四、惰性组 | (234) |
| (821) | 第四节 油页岩混合组分和无机显微组分 | (234) |
| (121) | 一、沥青矿物基质 | (234) |
| (021) | 二、无机矿物组成 | (235) |
| (181) | 第二章 油页岩有机地球化学 | (237) |
| (181) | 第一节 元素组成与红外光谱特征 | (237) |
| (121) | 一、元素组成 | (237) |
| (121) | 二、油页岩的红外光谱分析 | (237) |
| (121) | 第二节 油页岩的有机质类型 | (240) |
| (121) | 一、油页岩的有机质类型与分布 | (240) |
| (121) | 二、各类型有机质显微组分特征 | (241) |
| (021) | 第三节 油页岩中的生物标记化合物 | (241) |
| (021) | 一、正烷烃与异戊间二烯类烷烃 | (241) |
| (121) | 二、甾烷类化合物 | (241) |
| (021) | 三、藿烷类化合物 | (242) |
| (021) | 四、卟啉化合物 | (242) |
| (021) | 第四节 油页岩的成熟度 | (243) |
| (021) | 一、镜质组反射率与热解峰温法 | (243) |
| (021) | 二、油页岩的荧光特征法 | (245) |
| (021) | 第五节 油页岩的生烃潜力 | (245) |
| (021) | 一、油页岩的生烃数量 | (245) |
| (021) | 二、油页岩的产烃类型 | (246) |
| (021) | 第三章 油页岩化学 | (251) |
| (021) | 第一节 无机化学组成 | (251) |
| (121) | 一、灰分产率、成分、灰熔点与分类 | (251) |
| (121) | 二、微量元素 | (252) |
| (121) | 第二节 主要工艺性质 | (254) |
| (121) | 一、焦油产率 | (254) |
| (121) | 二、发热量 | (254) |
| (121) | 三、密度 | (255) |
| (121) | 第三节 化学结构 | (256) |
| (121) | 一、油页岩有机质族组成结构 | (257) |
| (121) | 二、油页岩干酪根单元的“分子量”和“化学式” | (257) |
| (121) | 三、油页岩干酪根化学结构 | (258) |
| (121) | 第四节 中国的油页岩工业—成因分类 | (258) |
| (121) | 一、油页岩分类的研究概况 | (258) |
| (121) | 二、中国的油页岩分类方案 | (258) |
| (121) | 第四章 中国油页岩矿产 | (261) |

| | |
|------------------------------|--------------|
| 第一节 新生代油页岩····· | (261) |
| 一、黑龙江伊兰达连河油页岩矿床····· | (261) |
| 二、山东黄县和广东茂名油页岩矿床····· | (264) |
| 三、吉林桦甸油页岩矿床地质特征····· | (266) |
| 四、辽宁抚顺油页岩矿床地质特征····· | (267) |
| 第二节 中生代与古生代油页岩资源····· | (267) |
| 一、白垩纪油页岩····· | (267) |
| 二、侏罗纪油页岩····· | (268) |
| 三、三叠纪油页岩····· | (269) |
| 四、古生代油页岩····· | (270) |
| 第五章 油页岩地质特征与资源分布····· | (273) |
| 第一节 地质特征····· | (273) |
| 一、油页岩生成地史期····· | (273) |
| 二、含油页岩地层剖面类型····· | (273) |
| 三、油页岩沉积环境····· | (274) |
| 四、大地构造运动的控制作用····· | (274) |
| 第二节 中国油页岩资源分布····· | (276) |
| 一、时代分布····· | (276) |
| 二、地理分布····· | (276) |
| 三、油页岩资源特点····· | (276) |
| 第三节 世界油页岩资源····· | (278) |
| 第六章 油页岩资源开发展望····· | (280) |
| 第一节 中国油页岩的工业利用····· | (280) |
| 一、油页岩灰的利用····· | (280) |
| 二、页岩油的加工····· | (280) |
| 第二节 应用开发研究····· | (281) |
| 一、油页岩热解与燃烧动力学研究····· | (282) |
| 二、粉矿油页岩超临界流体抽提法····· | (283) |
| 三、油页岩工业利用新途径的研究····· | (283) |
| 四、国外油页岩综合利用的新进展····· | (285) |
| 第三节 油页岩资源开发前景····· | (286) |
| 一、油页岩资源开发前景····· | (286) |
| 二、油页岩资源开发建议····· | (286) |
| 参考文献····· | (288) |

第一部分 非常规天然气

非常规天然气系指与常规天然气聚集方式不同,且不能用常规方法进行勘探开发的天然气,主要包括煤层甲烷、致密砂岩气、水溶气、甲烷水合物、页(泥)岩气等。众多的研究者认为,世界天然气工业的发展前景将是很大的,虽然中国天然气工业发展滞后于石油工业(即已探明的油气资源比远低于世界水平),但天然气作为优质能源,必将大大发展。从目前的勘探开发现状看,天然气正在以比石油更快的速度发展,因此可以预言,到21世纪初,在世界能源结构中很可能会出现一个天然气时期(胡见义,1985;包茨等,1988)。天然气工业的快速发展,不是简单地因为其它资源可采储量的减少,更重要的是在于天然气比石油、煤炭具有更大的优越性。比如在解决环境污染问题上,据前苏联天然气工业部宣布,一些工业发达的大城市,使用天然气后,其污染情况得到了很大的改善,莫斯科、第比利斯等城市,空气中的尘灰含量减少了,氧化硫的含量则降低到只有以前的 $1/2\sim 1/9$ 。天然气除作为工业能源外,也是十分优良的化工原料,在人们的日常生活中已广泛使用,举凡衣、食、住、行诸方面,天然气都能发挥它的作用。因此可以说,社会的需要促使天然气工业要有较大发展。随着社会对天然气需求量的增加,常规天然气可采资源量减少,勘探难度也越来越大,仅凭勘探开发常规天然气已不能满足这一要求,那么重视研究和勘探开发非常规天然气则是一个不可避免的发展趋势了。

有人预测,全世界非常规天然气地质储量约 $1000\times 10^{12}\text{m}^3$ ^①,这是一部分很有前景的资源。初步评估,中国非常规天然气资源量可达 $95\times 10^{12}\text{m}^3$ 以上,这为勘探开发非常规天然气奠定了雄厚的物质基础。

目前,不少国家越来越重视非常规天然气的研究与开发,这项工作走在世界前列的要算美国、日本等国。近十多年来,美国煤层甲烷的开发利用已从原始的煤田瓦斯排放发展成为独立的煤层甲烷工业,并成为引人注目的工业部门,同期在页岩气、致密层天然气的勘探开发中也获得了巨大的效益,可以说正是由于重视非常规天然气的研究与开发,才使美国的天然气产储量免于出现滑坡。日本这个能源短缺的工业大国,在开发水溶气资源中受益匪浅,并在水溶气研究方面取得了许多新认识。国外近年来对非常规天然气的研究非常踊跃,1980年美国出版了专著(Satriana, M., 1980),并于1984年5月专门举行了270多人参加的非常规天然气开采座谈会。从已有的文献中看,研究对象主要为煤层甲烷,其次是致密砂岩气、水溶气和页(泥)岩气。涉及的内容有非常规天然气的富集控制因素、产出机制、储层特性、各类盆地的资源潜力预测与评价、通过试验区优化研究技术优化开发方案以及经济评价等;同时在钻井工艺、试井、测井和井下作业等油气工程技术方法上亦有较多的研究成果(Kuuskras, V. A. 等, 1983; Davidson, J. M., 1986; Matthews, R. D., 1986; Oakes, S. C. 等, 1987; Malone, P. G. 等, 1987; Nederlof, M. H., 1988; Palmer, I. D., 1989)。总的来说,国外在非常规天然气研究方面已取得了丰硕的成果,这为我们的研究及勘探开发工作提供了借鉴。中国在非常

① 弗·库克斯克拉等,1980年国际天然气资源会议。

第一章 煤层甲烷

煤层甲烷是一种储集在煤层中的自生自储式的天然气。煤层甲烷之称是由于这类天然气往往以甲烷占绝大部分之故,也有称其为煤层气的,在煤炭工业中的煤层瓦斯与之相当。煤层甲烷从源岩及形成角度讲,它是煤成气(煤型气、煤系气)的一部分。煤本身就是一种资源,同时又是一类可产生油气的烃源岩,现今人们又视其为颇具特性的天然气储集层—煤层甲烷的产层。

众所周知,从前煤层甲烷伴随着煤层的开采不断涌入煤矿坑道并向大气逸散,常常危及矿井安全且污染环境,因而被视为灾害;人们为了减少瓦斯引起的灾害,着手抽放,与此同时将抽放出的瓦斯进行有效的利用,这一时期煤层甲烷是作为采煤的副产品对待的;70年代末,想利用、甚至把煤层甲烷当作商品出售的少数企业家当时曾被人视为“疯子”,而恰恰正是这些“疯子”们开拓出了一个勘探开发天然气的新领域。当今世界上,对煤层甲烷这种非常规天然气资源的看法,已发生了根本性的观念转变,许多工业发达的国家不再将瓦斯视为灾害,而是一种宝贵的资源,特别是在世界能源紧缺的压力下,这种观念上的转变更为明显。如俄罗斯等国已将煤矿床看作“煤—甲烷”矿床,把煤层甲烷视同煤一样进行开发利用。美国近十多年来,引进常规油气钻井、开采技术进行煤层甲烷开采,并根据煤储层的特点不断改进,获得成功,可在相当大的范围连片开采,开采深度超过采煤深度,获得了巨大的经济效益,逐步形成了一个新兴的工业——煤层甲烷工业。煤层甲烷的开发,不仅在于它是一种潜力巨大的资源,而且在于它对减少煤矿瓦斯灾害和防止其对大气污染亦有益,另外开采煤层甲烷具有深度较浅、投资小、见效快的特点,据统计美国1978年国内的常规天然气成本80.71美元/1000m³,而煤层甲烷的成本仅37.50美元/1000m³,可见煤层甲烷的成本还不到常规天然气的一半。对煤层甲烷的开发正在日益受到产煤国家的重视,许多国家已投入了煤层甲烷开采活动,尤以美国最为活跃。

中国是一个煤炭大国,煤层分布面积广泛,煤炭资源十分丰富,据有关资料(引自张新民等,1991),全国煤炭资源总量为 $50479.26 \times 10^8 \text{t}$ 。丰富的煤炭资源中,蕴藏着非常可观的煤层甲烷。中国对煤层甲烷的开发,目前主要为保证煤矿安全生产而进行抽放瓦斯(潘振武,1989),全国有48%左右的煤矿矿井为高沼和煤与瓦斯突出矿井,1987年全国煤矿瓦斯抽放量为 $3.85 \times 10^8 \text{m}^3$ 。可喜的是,近几年有关部门与国外合作,在华北、东北等地已开展了煤层甲烷的试验性勘探开发,这将为此项工作的全面展开和深入打下一个基础。

在学术研究方面,美国1977年至1982年间,作为国家非常规天然气开采计划的一部分,实施了煤层甲烷的开采计划,对全美13个盆地埋深1829m以上的煤层甲烷资源进行了评价。1983年和1984年相继出版了《美国的煤层甲烷资源》巨著;1989年美国天然气研究所,对18个含煤盆地的煤层甲烷资源进行了评价;70年代后期至今,美国在各有关学术会上煤层甲烷的研究成果不断增加,1987年和1989年专门召开了大型的煤层甲烷讨论会,并出版了文集(Rightmire, C. T. 等主编,1984;The University of Alabama 等,1987;The University of Alabama 等,1989;Boyer II, C. M., 1989);自1983年起,美国创办了煤层甲烷专门刊物《煤层甲烷开采技术》(季刊)。可以说美国在煤层甲烷的研究方面亦进入了一个较新的阶

段。前已提及,中国的煤层甲烷研究目前已经开展起来了,笔者深信此项研究工作会逐步全面展开并深入下去的。

煤层甲烷不仅产自煤层,而且储集于煤层,故此煤层的成烃机制、物理化学性质、储集性能等则成为研究煤层甲烷的基础内容;系统分析煤层甲烷的赋存状态、产出机理以及影响煤层甲烷富集的主要地质因素,则是对煤层甲烷资源评价、指导勘探的理论依据。本章除就上述问题进行论述外,还就中国煤炭资源分布作了简要介绍,同时初步对中国煤层甲烷资源量进行了评估。

从煤层中解析出的天然气,在一定的地质条件下可以聚集成藏,这可视为煤层甲烷资源的一种类型。值得一提的是,煤层甲烷的主体是聚集于煤层中的天然气,但煤层上下围岩如果储集条件好,也可能储存一定量的天然气,与煤层中天然气一同产出,这是一个需要指出的问题,只因这并非煤层甲烷的主体,同时因为煤层围岩储集层往往就是常规储层,故在本章中不作专门论述。

第一节 煤层成烃概论

煤这种富含有机质的矿产,可作为烃源岩已被众多的研究者所接受,煤是煤成气的主要源岩之一。由于煤储层较为致密等特性,储集于煤层中的煤层甲烷的源岩则为煤层本身。煤层围岩的暗色岩类产生的天然气也有可能通过运移到煤层中去,但根据单位体积煤的产气率与含气量相比,如无烟煤阶段,煤产气率 $210\sim 490\text{m}^3/\text{t}\cdot\text{煤}$,而无烟煤最大含气量一般为 $30\sim 40\text{m}^3/\text{t}\cdot\text{煤}$ 左右,只有产气量的 $1/10$,由此看来煤层产生的气除内部饱和并调整外,将主要向煤层以外运移。所以,煤层甲烷是由煤层本身产生的,即使有外来成分也很少,可以忽略不计。

一、煤的地球化学特征概述

煤这一研究对象的特别复杂性、多样性和不均一性,加之影响煤的组成与结构的因素也较多,所以给研究煤的地球化学特征带来了诸多不便。另外由于研究目的不同,工作的侧重点亦有别。在此我们主要就煤作为油气源岩的基本特性进行概括的论述,鉴于中国以腐殖煤占绝大多数,故此讨论也以腐殖煤为主。

据实验数据统计,煤的有机碳含量为 $60\%\sim 80\%$,煤的有机碳丰度除受原始的沉积因素影响外,与煤的变质程度也密切相关,随变质程度增加,其有机质芳核缩聚程度逐渐增高,碳的富集程度也相应增高,因而,反映在有机碳含量上,可由泥炭的 20% 以下增高到无烟煤的 $80\%\sim 90\%$ 左右。煤的氯仿沥青“A”含量变化较大,为 $0.01\%\sim 7\%$,随煤变质程度增高,氯仿沥青“A”由小到大再变小,褐煤其含量较低,中变质程度的煤种,如气煤—肥煤,常常有较高的氯仿沥青“A”含量,在 $1\%\sim 3.5\%$ 范围内,约为正常生油岩的 $10\sim 30$ 倍,随后氯仿沥青“A”递减。如果按中国陆相生油岩下限标准氯仿沥青“A”/有机碳为 $40\text{mg}/\text{g}$ 、烃/有机碳约 $20\text{mg}/\text{g}$ (黄第藩等,1982)衡量,中国石炭—二叠系煤的氯仿沥青“A”/有机碳为 $6.2\sim 56\text{mg}/\text{g}$,大部分在 $20\text{mg}/\text{g}$ 以下,烃/有机碳在 $1.2\sim 19.2\text{mg}/\text{g}$,一般都不够差的生油岩的指标范围,这就是说,尽管煤的有机质含量较高,但其向石油转化能力一般却很差,这是因为煤的丙

部结构组成不同于一般生油岩之故。它是由带有较短侧链的稠环芳核结构组成,这就决定了煤在热降解的过程中主要生成小分子的烃类物质,即以生成天然气为主,而只能生成少量的液态烃。煤的氯仿沥青“A”族组成具有:饱和烃含量低,一般为1.71%~22.0%,且大多低于10%;芳烃含量相对较高,3.68%~32.0%,绝大多数大于10%;饱和烃/芳烃绝大多数小于0.7,一般在0.19%~1.89%之间,这与一般生油岩饱和烃/芳烃大于4有明显区别;非烃含量在8.81%~49.52%之间;沥青质含量高,达21.0%~73.78%,一般在50%以上。根据不同变质程度的煤样分析数据作族组成与其演化程度关系(图1-1)看,无论煤的变质程度如何,其氯仿沥青“A”的各族组分含量具有这样一个规律,即沥青质>非烃>芳烃>饱和烃。

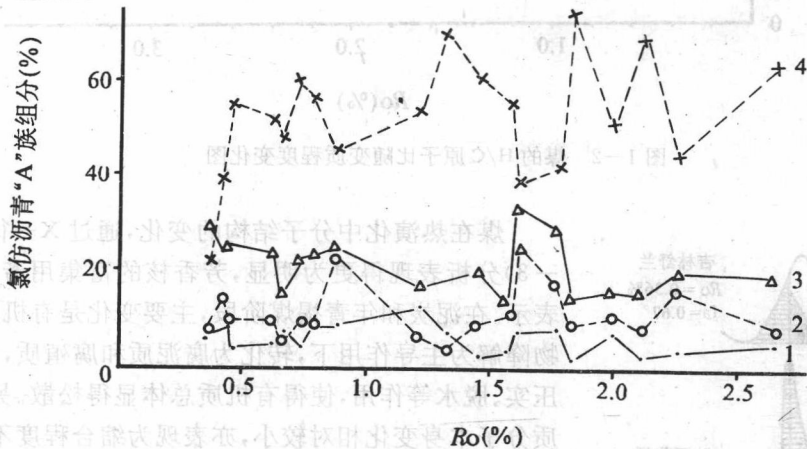


图1-1 煤的氯仿沥青“A”族组分与其演化关系图

1. 饱和烃 2. 芳烃 3. 非烃 4. 沥青质

煤的有机质是由各种复杂的高分子有机化合物所组成的混合物,主要有机元素有碳、氢、氧、氮和硫。碳是煤中最主要的元素,约占60%~80%,其次是氧,约占10%~20%,氢为3%~6%。碳主要集中在稠环芳核上,构成稠环芳香系统的骨架,而氢主要分布于连接芳香核的脂链、脂环和芳香环中。随着煤化程度增高,由于支链断裂和芳核缩聚而使碳相对富集,氢则逐渐减少(图1-2)。因此,煤的碳、氢含量在一定程度上反映了煤的变质阶段和转化程度。煤的H/C原子比一般小于1.0。

根据煤岩学和煤化学的研究,煤的显微组分包括镜质组、丝质组和稳定组,镜质组是高等植物支撑组织在弱氧化-还原条件下经凝胶化作用而形成的凝胶化物质,其化学组成以芳香结构为主,支链多而短;丝质组主要是在氧化条件下经丝炭化作用形成的丝炭化物质,在化学结构上亦以芳香烃为主,支链主要为杂原子官能团;稳定组由植物的某些富氢器官组成,如孢子、角质、树脂和木栓等,其化学结构中烷基链较长。各显微组分的上述结构组成的不同,使有机元素组成中氢含量稳定组>镜质组>丝质组,导致产油、气潜力也存在这种序列(下面将论述)。中国目前已发现煤成气藏的盆地,其主力气源岩之一的腐殖煤,以镜质组含量占绝对优势,一般在50%~90%之间,丝质组次之,在10%~35%之间,稳定组一般小于10%。

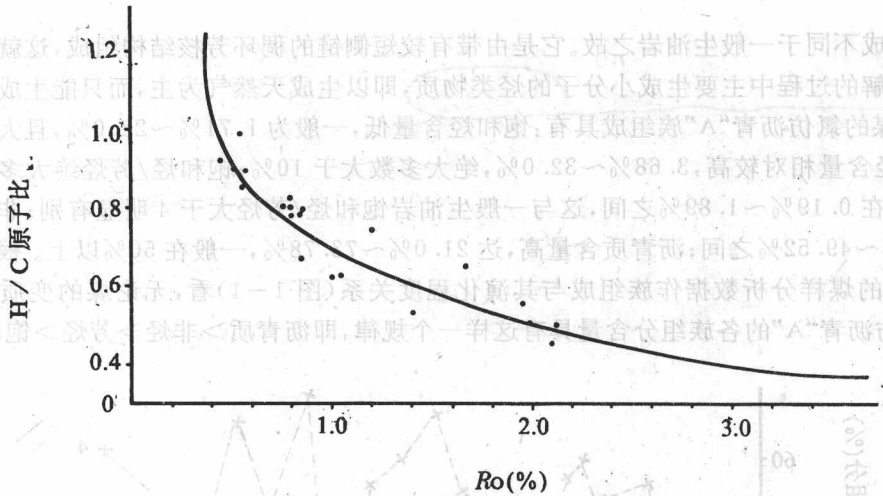


图 1-2 煤的 H/C 原子比随变质程度变化图

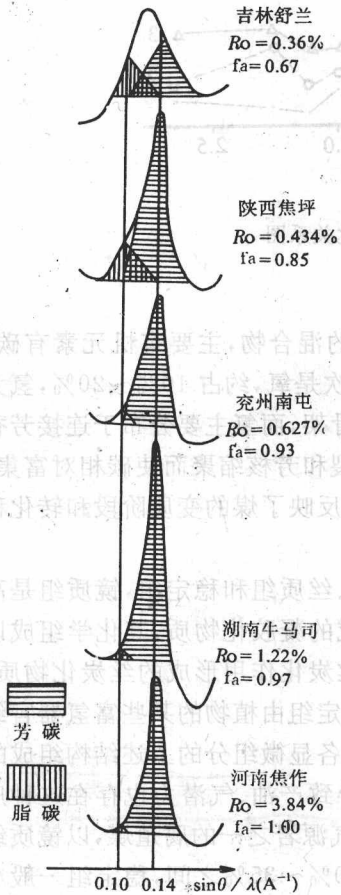


图 1-3 煤的 X-衍射图

煤在热演化中分子结构的变化,通过 X-衍射(图 1-3)分析表现得更为明显,芳香核的富集用芳香度(f_a)表示。在泥炭和年青褐煤阶段,主要变化是有机质在以生物降解为主导作用下,转化为腐泥质和腐殖质,由于缺少压实、脱水等作用,使得有机质总体显得松散。另外,有机质分子本身变化相对较小,亦表现为缩合程度不高,但原始物质的早期转化后的差别却十分明显。在低成熟阶段,芳核很少且随机分布,由大量的富氢官能团、富氧桥以及脂肪族侧链支撑和联结着芳香核,随着热演化的进行,开始表现为芳核外分子剥裂,如脱落羧基($-\text{COOH}$)、羟基($-\text{OH}$)、甲氧基($-\text{OCH}_3$)以及羰基($>\text{C}=\text{O}$)官能团等,进而转变为脂肪族、脂环官能团与侧链的脱离和降解。经过上述变化,形成大量的有机的或无机的物质,并逐渐脱离母体排出,同时有机质本身芳香核逐渐缩合增大。至高成熟阶段,有机质的芳香母核所带的侧链或官能团所剩不多,由于芳香分子的进一步缩合,离域电子数增多。

煤的上述诸特征及演化,从根本上影响煤的油气生成过程。

二、煤成烃的模拟实验

模拟实验是系统全面地了解煤演化成烃的主要手段之一。通过模拟实验,一方面能够深入地了解煤在热演化过程中的成烃机制及其主要热解产物的热演化规律、各组分间的配置与变化特点;另一方面,可以定量测定煤在

不同演化阶段的产气(油)率,为评价煤层甲烷(煤成气)资源等提供基本参数。近年来,笔者与有关人员合作,就沉积有机质油气生成与演化的模拟实验研究方面做了许多工作,并取得了一些有益的认识(关德师等,1987,1991,1992;程克明等,1991;张文正等,1991)。其中实验研究中涉及到许多有关煤的研究工作,包括了各种煤样,如残植煤、烛藻煤、腐泥煤以及云南、新疆、山东、内蒙古、辽宁和陕甘宁盆地等地区的褐煤、长焰煤等,总计样品达38个,每个样品从模拟实验到配套的分析化验都进行了全面的研究,在此我们不可能就这些工作及认识进行全面的论述,为了了解煤在整个演化过程中的变化,我们只选三个有代表性的样品的实验结果作为讨论问题的素材,最后在统计煤在不同演化阶段产气率时,将全部实验结果都用上,以求确定一个较为全面的煤的产气率数据域。

(一)模拟实验流程及代表实验样品

实验装置由热解加温(包括温压釜、管式加温炉膛和自动控温仪)和收集计量两大部分组成(张文正,1991)。

实验流程是实验前预先将样品粉碎至120目以下,在低温条件下(50℃左右)烘干。然后称取一定量的样品(几十~几百克),装入温压釜内密封,用真空泵抽空数小时,将空气全部排出,把釜置于管式炉中加热。自动控温,持续恒温后切断电源,自然冷却至300℃左右,连接温压釜与收集计量装置进行收集计量。在温压釜与气体计量系统之间增设一套油水冷却收集装置,将盛-50~-80℃无水乙醇的保温杯套在油水冷却收集管外,打开温压釜高压阀门,使高温气相混合物自温压釜腔内流出,在通过冷冻管时,油和水即呈冰状冻结在冷冻管的下部和壁上,气体进入计量管。控制好高温混合气的流出速度,可使C₆以上液态烃和水全部冷冻下来。油、水进行分离并计量分析。

所选的三个代表性样品的原始组成分析结果见表1-1。浙江长兴残植煤富含利于产生烃类的壳质组,黄县褐煤和宝秀褐煤为一般煤样,从表1-1可以看出,这三个煤样的原始组成不同,从成烃角度看,母质性质依次变差。

表1-1 实验样品性质分析数据表

| 样品 编号 | 采样地区或井号 | 地层 | 岩性 | R _o (%) | 有机碳 (%) | 原子比 | | 显微组分(%) | | |
|----------|--------------|----|-----|-----------------------|------------|------|------|---------|-------|------|
| | | | | | | H/C | O/C | 稳定组 | 镜质组 | 丝质组 |
| 1 | 浙江长兴煤矿 | P | 残植煤 | 0.60 | 63.16 | 1.06 | 0.06 | 82.83 | 15.65 | 1.52 |
| 2 | 山东黄县 | E | 褐煤 | 0.42 | 60.80 | 1.03 | 0.16 | 1.0 | 96.0 | 3.0 |
| 3 | 云南宝秀盆地 ZK4 孔 | Q | 褐煤 | 0.21 | 56.20 | 0.94 | 0.23 | 6.0 | 77.0 | 17.0 |

(二)依模拟实验结果讨论煤成油气机理及演化特征

有机质埋藏较浅的未成熟阶段,温度等营力不足以使有机质发生大的变化,在此阶段厌氧微生物—甲烷菌能够对有机质的演化产生较大的影响,并产生以甲烷为主的气体,即生物气。甲烷菌是一种专性厌氧微生物,须在严格的厌氧环境中存活,为了生存,甲烷菌要从其周围获取各种营养作为其生命活动的物质基础。据观测,富含有机质的浅海、湖泊等是微生物