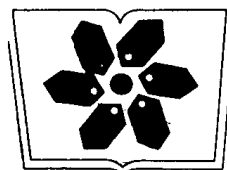


天然气成因理论及应用

徐永福等著 地质出版社

天
地
人
文
四
大
因
理
之
理
學

王
陽
明
學
說
大
綱



中国科学院科学出版基金资助出版

天然气成因理论及应用

徐永昌等著

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书以天然气形成演化的多源复合、多阶连续成因理论为基点,提出了系统的、科学的天然气成因分类体系及综合判识模式。

书中集多年天然气的研究成果,详尽地论述了气源岩的时空分布,天然气的形成演化,不同成因类型天然气、伴生液态烃及气源岩的地球化学特征,并进行了实例分析;阐述了生物-热催化过渡带气成因理论和幔源氮的工业聚集;对非烃及稀有气体进行了系统的同位素地球化学研究,并介绍了我国非生物成因气研究的最新成果和油气地球化学勘探理论。

本书对天然气成因理论和应用研究进行了全面而系统的总结,研究方法和分析技术处世界前沿,既有高水平的基础理论,又有丰富、详实、新颖的实际素材,对从事地质学、地球化学、石油及天然气地质学研究和教学乃至石油天然气地质勘探人员都具有重要参考价值。

天然气成因理论及应用

徐永昌 等著

责任编辑 吴寅泰

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京理工大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994年1月第一版 开本:787×1092 1/16

1994年1月第一次印刷 印张:26 1/2 插页:2

印数:1—1000 字数:613 000

ISBN 7-03-004010-4/P·740

定 价: 29.00 元

序

以徐永昌同志为首席专家的、主要由中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室固定和客座人员参加及撰写的专著——《天然气成因理论及应用》问世了。它不仅是一个实验室近10年科研工作的总结,也是我国目前对天然气成因理论最全面而系统的探讨。该专著是近3万项次天然气各种地球化学参数的结晶升华。周密细致的地质观察结合多种多样的分析测试,使该书作者们逐渐领悟出“多源复合、多阶连续”的新认识。这一观点贯穿了整个专著。

在该书中,作者们深入讨论了他们首次提出的生物-热催化过渡带气理论,并完善了天然气成因分类体系及综合判识模式。围绕作者们近年来突出科研成果——具工业意义慢源氨在国内外的首次发现及与之有关的非烃气藏、非烃气体等,展开了同位素地球化学讨论,提出了富含非烃天然气的分类模式及成因判识模式,开拓了氨和氮的天然气地球化学研究,并探索了非生物成因与深部来源气的理论。

此外,作者们还就与天然气伴生的凝析油、轻质油的地球化学特征,天然气的形成与聚集,我国不同类型气源岩的特征与时空分布等重要问题作了探讨。

该专著的另一特色是它熔天然气理论与勘探于一体。它综合了十一种油气地表地球化学勘探指标的详细资料,阐述了各种烃类比值判识油气地球化学勘探异常的依据,并在理论上作了论证和提高。对我国天然气资源评价和远景问题,该书也进行了有益的讨论。

相信该书的出版将有助于我国还较年轻的天然气事业的发展及天然气理论的深入。

涂光炽

1993年1月15日

• i •

前 言

《天然气成因理论及应用》专著是中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室固定和客座人员近十年科研成果的总结,同时吸收了石油、地质系统的部分科研成果,是我国目前全面、系统的有关天然气成因理论方面的一部专著。

本书以气态烃为主,以“多源复合、多阶连续”的天然气成因新模式的思想为横线提出了新的天然气成因分类系统,讨论了各种类型天然气的形成特征、判识标志以及利用天然气的地球化学特征在油气勘探实践中的应用。本书在下述方面有其独特的见解:

1. 提出了天然气形成演化的多源复合、多阶连续的成因理论

在多年工作资料积累的基础上,从成油与成气的地质地球化学特征对比入手,认为天然气形成演化完全有别于石油的演化,天然气的多源、多阶段连续形成演化特征明显,所有的有机母质在演化过程中均可形成天然气,有机来源尽管是目前勘探开发的烃类气体的主要来源,但无机来源甲烷不可忽视。

2. 提出系统的科学的天然气成因分类体系及综合判识模式

根据天然气的物质来源、形成演化阶段及其地球化学特征,将天然气来源划分为两大系列,即有机(生物)成因和无机(非生物)成因气,基于有机母质地球化学特征,将有机成因气划分为油型气(腐泥型母质)和煤型气(腐殖型母质),进而根据母质演化的外生营力,划分为生物成因(细菌)气、生物-热催化过渡带气,热解气和高温裂解气。对无机来源天然气,按其形成特征划分为地幔原始捕获气和岩石化学反应气。以大量的实际地质地球化学资料和实验数据的综合分析为依据,采用镜质组反射率,气体组分,稳定同位素和稀有气体氮、氩同位素,伴生轻质油、凝析油的特点及其对应的演化阶段、演化特征等指标,提出了各类天然气综合判识模式,进行气-气对比和气源对比,使天然气成因理论更系统、更完善,并从定性判识逐步向半定量、定量判识迈进。

3. 生物-热催化过渡带天然气的系统研究

基于前期工作提出的生物-热催化过渡带气成因类型作了进一步研究,提

出并完善了生物-热催化过渡带天然气成因理论,系统研究了过渡带气的地球化学特征,探讨了过渡带气形成的地质地球化学条件和成岩作用对过渡带成气的影响,初步认为过渡带气形成机制为:

在温度不高(50—85℃),一定矿物岩石,特别是伊利石等粘土矿物参与下的微催化作用,有机质降解的脱羧、脱官能团作用以及芳香族的缩聚作用,这些作用发生在沉积盆地 $R^o = 0.3—0.6\%$ 的演化阶段,相应深度 1000—2500 m 乃至 3000 m 的中、新生代沉积盆地,其产物特征是天然气组分偏干, C_1/C_{1-5} 为 0.7—0.98, $\delta^{13}C_1$ 为 -60 或 -55—-40 ‰ 范围,并伴生早期轻质油或未成熟油。从母质特点看,Ⅰ_b-Ⅲ型母质更利于形成过渡带气,而Ⅰ-Ⅱ_a型母质在该阶段主要形成未成熟油。过渡带气理论的提出,进一步完善了天然气形成“多源复合,多阶连续”的演化模式。

4. 首次发现幔源氦在沉积壳层的工业储集

在我国华夏裂谷地区,沿郑庐断裂带的松辽盆地、辽河盆地、苏北盆地和广东三水盆地的一些工业气井中,氦的含量达到工业品位(0.1—1.34%)。根据气样的氦同位素比值($^3\text{He}/^4\text{He}$),采用二元混合模式计算,其中幔源氦组分在氦气中的含量达 30—70%。幔源氦在地壳沉积层中工业储集的首次发现,受到国际同行的极大关注(第七届国际同位素地质会议,1990年9月)。它对幔源挥发分的运移聚集,包括对无机(非生物)成因天然气的研究均有重要的理论和实际意义。

5. 对我国主要非烃气藏(N_2 、 CO_2 和 He)及天然气中非烃气体进行了系统的同位素地球化学研究

系统研究了天然气中非烃和稀有气体的地球化学特征,并探讨非烃和稀有气体在研究天然气形成演化中的作用,认为天然气中非烃主要有三大来源:幔源、壳源和大气。稀有气体同位素除核过程形成外,放射性成因同位素主要来自沉积壳层。对天然气中汞进行了讨论,认为它是判识气体类型的重要指标。对非烃气藏进行研究,提出了富含非烃天然气的分类模式及成因综合判识标志。根据非烃气体组成和同位素组成特征,以氦的同位素组成,将 CO_2 气藏的成因划分为三种类型:(1)与地幔物质来源有关的无机成因 CO_2 气藏,如松辽(万金塔地区)、苏北、广东三水盆地等的 CO_2 气藏;(2)苏北黄桥地区上第三系浅层 CO_2 气为与幔源有关的氦和有机成因 CO_2 的混合气藏;(3)甘肃窑街煤矿 CO_2 突出气是烧变岩形成的壳源 CO_2 气。

6. 开拓了氦和氩的天然气地球化学研究

研究了 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的年代积累效应与甲烷成熟度之间的相关

性,用以探讨天然气的成因,进行气-气、气-源对比,为解决我国某些地区长期争论的气源问题提供了重要的科学信息,如四川威远气藏和甘肃密街煤矿CO₂的气源问题。建立了氮的同位素测试技术并应用于天然气地球化学研究。

7. 研究了与天然气伴生凝析油和轻质油的地球化学特征

通过对凝析油轻质油的饱和烃、芳烃化合物和稳定同位素组成特征的研究,提出了不同母质和环境形成的天然气与其伴生的凝析油的成熟度分类模式,指出三萜系列和含硫芳烃具有指相意义。并采用饱和烃、芳烃等碳氢同位素组成特征判识凝析油及天然气的成因类型,进行油气源对比和探讨油气运移,指出氢同位素是研究沉积环境水介质条件的一项重要指标。

8. 非生物成因气的研究

从理论上,讨论了非生物成因天然气理论的宇宙化学依据和地球原始甲烷存在的证据及其热力学稳定性,讨论了深部气体的地球化学特征及其地质构造标志,探索了非生物成因气的理论,通过多种地质地球化学分析综合研究,认为腾冲地区温泉气中的甲烷可能来自地幔。

9. 研究了我国不同类型气源岩的地球化学特征及时空分布

通过对源岩有机质丰度、母质类型、演化特征和生气潜能的研究,探讨了不同气源岩中有机质的富集程度对产气率的影响,对烃类源岩显微组分进行了详尽分类,建立了不同类型源岩演化及成烃模式和成烃机制,对我国气源岩的时空分布进行综合研究,讨论了不同时代源岩分布特征和我国气源岩的空间分布,为进一步寻找大中型气田指出了方向。

10. 油气地表地球化学勘探理论研究

综合十一种油气地表地球化学勘探指标的资料,讨论了土壤烃类的赋存状态、运移方式、运移过程的地球化学效应及各种地质因素的影响,并论述了采用各种烃类比值判识化探异常的依据。对典型地区 ΔC 环形异常碳同位素组成的系统研究,提出了环形异常 ΔC 及其碳同位素分馏模式,对该项技术从理论上作了论证和解释。

书中所用的基础资料,主要来源于徐永昌、沈平等近十年来所承担的国家及中国科学院的各种课题,非生物气部分来源于王先彬承担的国家基金课题。第四章从资料到编写均为本室客座人员程克明所提供和完成。引用其他单位资料时均详细注明了出处。

本书写作经集体讨论,个人执笔,最后由徐永昌、沈平、刘文汇、陈践发、陶明信再次集中讨论,统一修改。各章节写作人员为:第一章 徐永昌;第二章

陈践发；第三章 刘文汇；第四章 程克明；第五章 徐永昌、刘文汇；第六章 陈践发、王万春；第七章 刘文汇、徐永昌、沈平；第八章 沈平、文启彬；第九章 陈践发、徐永昌、沈平；第十章 沈平、陈践发；第十一章 陶明信、沈平、李玉成；第十二章 杜建国、徐永昌、刘文汇、孙明良；第十三章 王先彬、徐胜、薛啸峰、陈践发；第十四章 徐永昌、沈平；第十五章 王先彬、申歧祥、张同伟、程学惠、张谦、杜建国。

为取得第一性资料，野外综合科研考察时，足迹遍及松辽、济阳、黄骅、辽河、冀中、东濮、泌阳、苏北、鄂尔多斯、酒西、吐-哈、准噶尔、塔里木、四川、柴达木、江汉、百色、三水、莺琼及海南等 20 多个含油区，采集气、液、固样品 3500 余件。工作中得到各油田工作同仁的大力帮助及支持。对有关样品，由本所、本室技术人员为主完成了近三万项次的物质成分和结构分析测试工作。

参加工作人员：稳定同位素分析文启彬、申歧祥、邵波、杨辉、钟山、张亚玲；组分分析潘旭、胡秀英；稀有气体同位素分析孙明良、申建中、季美英；轻烃分析彭韵硕、毛曼君；生油潜热、有机碳及 ΔC 分析耽桂元、来淑琴；地化勘探程学惠、周泽、张谦、吴贻华、吕德萱、毛晓岫等；参加工作的还有朱惠英、包生祥、李玉成、李晓明等。

本书初稿编辑由荣光华负责，裴豫敏参加部分工作，图件清绘有刘欣莲等。

在本书初稿完成后，由中国科学院兰州地质研究所所长谢鸿森教授主持，邀请了以包茨、黄第藩、戴金星教授为正副主任的评审委员会对本书进行了鉴定评审。地学部主任涂光炽教授为本书写了序。作者们对所有为本书作出贡献、进行支持的同志仅表诚挚的谢意。

中国科学院兰州地质研究所
气体地球化学国家重点实验室

徐永昌

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述.....	1
第二节 天然气形成特征——多源复合、多阶连续	2
第三节 天然气测试技术与天然气研究.....	6
第四节 研究大气田形成条件,促进大气田的发现.....	10
第二章 天然气的基本概念和性质	13
第一节 天然气的基本概念	13
第二节 天然气的物理性质	14
第三节 天然气的化学组分	24
第三章 天然气成因简述	29
第一节 烃类气体形成机制	29
第二节 有机质成气演化模式	36
第三节 非烃气体的来源	41
第四章 天然气源岩	49
第一节 天然气源岩的组成特征与类型	49
第二节 源岩的演化及成烃模式	59
第三节 我国气源岩的时空分布	71
第五章 天然气类型	84
第一节 天然气成因类型分类原则及方案	86
第二节 天然气成因类型判识标志	92
第三节 不同成因类型天然气综合判识	97
第六章 生物(细菌)气	102
第一节 生物气形成的生物化学作用和影响因素.....	102
第二节 生物气藏形成的模式.....	109
第三节 生物气的组分及同位素组成.....	113
第四节 生物气藏的分布和我国生物气的远景.....	118
第七章 生物-热催化过渡带气	122
第一节 地球化学特征.....	124
第二节 形成机制探讨.....	132
第三节 形成条件及地球化学环境.....	142
第四节 过渡带气与未熟油的对比.....	146
第八章 油型气	153
第一节 油型气的分布.....	153
第二节 油型气的地球化学特征.....	157

第三节	油型气田实例分析	167
第九章	煤型(成)气	189
第一节	我国煤型气形成的地质条件及其特征	189
第二节	煤型气气源岩的地球化学特征	195
第三节	煤系地层有机质成烃机理及演化模式	202
第四节	煤型气的地球化学特征	206
第五节	我国典型的煤型气藏实例分析	211
第十章	凝析油和轻质油	223
第一节	凝析油和轻质油的形成和分布	223
第二节	轻烃的组分特征和成熟度探讨	224
第三节	芳烃地球化学特征	238
第四节	轻烃的同位素地球化学特征	245
第十一章	高温裂解气	257
第一节	高温裂解气的形成条件	257
第二节	高温裂解气的地球化学特征	260
第三节	典型高温裂解气田实例	262
第十二章	非烃气体	270
第一节	轻稀有气体	270
第二节	二氧化碳	284
第三节	天然气中的氮	291
第四节	天然气中汞的地球化学特征和煤型气判识	295
第五节	其他非烃气体	302
第六节	富含非烃天然气的分类及其成因综合判识	308
第十三章	非生物成因天然气	317
第一节	非生物成因天然气理论	317
第二节	非生物成因天然气理论的宇宙化学依据	318
第三节	甲烷的热力学稳定性	321
第四节	地球原始甲烷	323
第五节	地球深部气体的地球化学特征	325
第六节	深源天然气的地质构造标志	331
第七节	非生物成因天然气探索	332
第十四章	气-气和气-源对比	344
第一节	气-气对比	344
第二节	气-源对比	354
第三节	气源综合对比	359
第十五章	油气地球化学勘探理论和应用	376
第一节	油气地表地球化学勘探指标和分析技术	376
第二节	土壤烃类的地球化学特征	383
第三节	土壤 ΔC 及其碳同位素的地球化学特征	394
第四节	土壤汞的地球化学特征	403
第五节	油气地表地球化学勘探	409

第一章 绪 论

第一节 概 述

天然气(Natural Gas),顾名思义,应当是自然界产出的各种气态元素和化合物的总称。但是,长期以来不仅在人民群众中,而且在科技界,通常都将以甲烷为主的烃类气体定义为天然气。各种文献在论述天然气时的一句常用语言“天然气是优质的能源和重要的化工原料”显然也是指以甲烷为主的烃类气体。本书也按这种概念来讨论天然气。即“天然气是以烃类气体为主体,常伴有一定数量非烃的气态元素和化合物的气体混合物”。人们也常把这种概念所确定的天然气称为狭义的天然气。

本书将广义概念的天然气拟用气体(Gas)一词来表示。例如一门新的学科分支——气体地球化学(Gas-Geochemistry)中所指的气体,即包括地球上标准状态下,在物质三态中以气态形式存在的元素和化合物。它包括赋存于地球各圈层的一切气体,这些气体以溶解状态赋存于水圈(包括地下水)或赋存于岩石圈的各种孔隙或封闭在矿物的结晶格架中等。在特定条件下,它们可以是液态和固态,但物理、化学条件的改变,使它们处于标准状态时,仍将以气态的形式存在。

首先引起人们注意和加以利用的是烃类气体的可燃性。关于天然气可燃性的文字记载史至少在三千年以上。我国早在公元前 1122—770 年,西周时期的《易经》中就有关于“泽中有火”的文献记载,这应当是甲烷在水面燃烧的现象。跋涉欧、亚的旅行家把发现的天然气燃烧称为“长明火”。这在公元前 1500 年格罗多特(Геродот)就发现了小亚细亚南部沿岸地带希麦拉山的“长明火”。当时的知识水平,人们只能把这种火的形成归之为上帝的创造,故“长明火”也被誉为圣火。希腊人为纪念这圣明之火,特地建造了一座“天地火圣庙”,直到 1885 年还有人记载这一圣火,火舌仍高达 1 m,宽 0.4 m。

中国被称为文明古国,从天然气的开发和利用的角度,确有可以引先人的智慧为荣的历史。早在公元前 3 至 1 世纪,四川邛崃已出现用顿钻所完成的钻井,它被用来获取天然气,当时称为火井。在四川自贡地区,到 13 世纪时,天然气的开采利用已达相当规模,利用钻井技术获得天然气,作为煮盐的能源。到 1840 年前后,在自贡地区我国已钻成 1200 m 深的天然气气井,获得了高产气流,火焰高达几十丈。据考证,当时仅在自流井气田已有日产 10 000 m³的气井 10 口。早在 150 年前,有如此规模开采水平的气田,在天然气的开采史上也应占有相当地位。当然,我们理应看到本世纪 60 年代以来,世界天然气工业的迅猛发展。直到 1950 年,天然气在世界能源消费结构中的比重还不足 10%,可是到 1970 年仅 20 年的时间,其比重已上升到 20%,可是在世界天然气开发利用史上占有重要地位的中国,直到 80 年代末,天然气在能源消耗结构的比例仅占 2.3%,这当然也是发人深省的。

作为优质能源和重要而价廉的化工原料,世界各国在近 30 余年间都强化了天然气的

勘探和开发,而且逐渐由油气兼探的局面发展到单独立项的天然气勘探,其所获成效也是非常显著的。以天然气的储产量为例,1950年探明储量仅为 $8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,产量 $1.851 \times 10^{11} \text{ m}^3$,但是,到1988年,世界天然气探明储量已达 $1.119 \times 10^{14} \text{ m}^3$,产量约 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。30余年储产量分别上升14倍和11倍,速度是惊人的。

世界主要能源的发展趋势,Marchett(1979;转引自胡见义,1985)作了回顾总结和发展预测。本世纪初是煤的时代,在1910—1930期间煤的消耗比例超过70%,其后逐步为石油所取代,本世纪中后期石油的消费接近或超过40%,至1990年油、气的消耗比将各为40%左右。从1985年世界油气探明储量看,石油为 $9.33 \times 10^{10} \text{ t}$,天然气 $9.77269 \times 10^{13} \text{ m}^3$,按 1000 m^3 天然气折合—吨油计,二者相近而天然气略大。据Marchett的预测,到2000年,天然气的消耗量将超过石油,2020年将成为能源消耗的主体,占总能耗的60%以上。据法国天然气技术协会的估计,届时天然气产量将为 $2.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。这将是我国现有探明储量的两倍以上。

我国天然气工业如果仅从解放至今40年间产量的增长来看,那可以说是闪电式的速度。因为如果也以1950年为基数,当时天然气年产量仅 $6.46 \times 10^6 \text{ m}^3$,如同样按1988年天然气产量进行比较,则由于当年我国天然气产量为 $1.39 \times 10^{10} \text{ m}^3$,则就提高的比例而言达2150倍;换言之,仅从数字比较我国在38年中天然气量的提高率是世界同期提高率的195倍。这种比例的形成主要是解放初我国天然气产量太低、基数太小的缘故。从国民经济发展需求的角度,从能源结构改善、优化的角度,必须极大地强化我国天然气勘探开发,才能较好地适应需要。

第二节 天然气形成特征——多源复合、多阶连续

近十年来,我国天然气地球科学研究有了迅速的发展,相应出版了一批天然气地球科学的专著,如包茨等(1988)著的《天然气地质学》、陈荣书(1989)主编的《天然气地质学》、戴金星等(1989)编著的《天然气地质学概论》、沈平等(1991)所著的《气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究》和张义纲等(1991)编著的《天然气的生成聚集和保存》等。这些著作的问世,不仅对天然气地球科学的发展有极大的促进,而且对加强天然气勘探、提高科技人员的认识水平、促进天然气工业的发展也起到了应有的作用。

长期以来,天然气地球科学从属于石油地球科学。天然气的勘探实践,也从属于石油的勘探实践。综观世界油气工业的发展史,都有一个油气研究合一、勘探兼顾不分的阶段。这与自然界油气常常相伴存在、多有生成联系的自然现象有关。随着油气勘探的迅速发展,天然气以纯气藏形式被发现的事例与日俱增。在生产实践的基础上,人们的认识也在不断深化,在认识到油气形成分布共性的同时,二者各自具有的特性也引起了极大的关注,天然气地球科学也自然成为一个独立的学科分支,从石油地球科学中分离出来。

关于石油和天然气在勘探开发上的差异,王镜心(1989)从天然气的形成、运移、储集、勘探、开采、运输、利用等方面总结了20条区别。从地球科学的角度,其最主要的区别应是天然气形成的多源、多阶段,运移比石油活跃,储集层要求较低,而盖层要求较严。

天然气形成的多源性是油、气形成最主要的差别,并由此造成油、气形成和分布的一系列差异。例如在天然气成因分类中,首先是将天然气分为有机成因和无机成因两大类。

国际上倾向于用生物成因和非生物成因来取代这两大类的命名(Schoell,1988),同时建议用细菌气取代生物气的命名。这意味着非生物成因的甲烷,作为天然气的一种来源,学术界已给予极大关注。尽管在石油成因领域也存在非生物成因学派,但其理论依据不足、自然界客观可考证的实例匮乏。天然气形成的多源性还体现在自然界各种类型的有机母质(I型、Ⅱ₁型、Ⅱ₂型和Ⅲ型)都能形成天然气。但对石油的形成,一般认为只有I型和Ⅱ₁型才利于石油生成。这样寻找天然气的领域就不仅包括可以形成石油的盆地,同时也包括了聚煤盆地。诚然,煤系可以成油的呼声和在聚煤盆地找到工业油田已有若干实例,但煤系成气的广泛性和形成的煤型气田的规模的煤成油相比,显然不可同日而语。

天然气形成的多阶性也是油气形成的明显差别。迄今为止,干酪根后期降解成油的理论仍占统治地位,尽管现在发现的油田也可找到一些被称为未熟和低熟石油的例子,但绝大多数仍然是有机质处于成熟阶段,即所谓石油窗、液态窗阶段的产物。可是,对天然气而言,至少成岩作用早期形成生物气(细菌气)及其工业气田,从理论到实际都是成立的。石油形成阶段的石油伴生气、有机质高成熟阶段的凝析油气和有机质热演化过成熟阶段的高温裂解气也都既有理论依据,又有客观气田存在。近年来,徐永昌等(1990)提出了在生物化学作用基本结束,热催化作用尚未达到液态烃大量形成的过渡层段,或地层埋深大致为1000—2500 m,乃至3000 m的层段同样是天然气形成的一个阶段,被称为生物-热催化过渡带气。受石油成因理论的影响,这个对于石油形成过去认为是门坎之外的层段,不仅对石油,而且对天然气也是被拒之门外的层段。80年代以来,在未成熟层段发现了特殊的、有工业价值的石油生成和聚集,被称为未熟或低熟油,这意味着无论在理论还是在实践上都突破了成油门限值的禁锢。即令如此,这个层段可以形成天然气的假说,直到80年代晚期才被提出来(王万春等,1988)。

1986—1987年间,通过对辽河盆地和苏北盆地的研究,我们发现了一组气体,其组分较干,以甲烷为主,乙烷以上重烃大于2%,甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 多处在一55—一50‰之间, $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 为一225—一250‰,产层埋深浅,一般在1000—2000 m的范围,也就是前面讨论的成油门限之外的层段。在过去油气形成理论中,对此层段油气形成均未考虑。对这个层段发现的天然气,由于其地球化学特性介于生物气和热催化气之间,故Stahl(1975)和Schoell(1983)将这种天然气划为生物气和热催化气的混合气。由于这组气体埋藏浅,相应地层热演化程度低, $R^0 < 0.5—0.6\%$,因此也有人将之划为生物气。但结合实际地质背景和产气层段有机质演化特征,发现该层段气体地球化学特征和该层段有机质热演化所应产出气体的特性是一致的,应属自生自储的气体。由于对其成气机理了解不够,将这一层段形成的气体命名为生物-热催化过渡带气。这个成气带的提出,使天然气的形成作用在地层垂直剖面上出现连续分布的格局。

近年来,Galimov(1988)对西西伯利亚北部一批超巨型气田,如乌连戈依气田(探明储量 $8 \times 10^{12} \text{ m}^3$)的成气机制,提出了新的重要的、有科学论据的假说,他认为这些气田是腐殖型有机质在较低温度下,以芳环化合物缩合作用为主所形成的。经理论计算和模拟实验,他得到了产烃模式图(图1-1)。

从图1-1中可知,对于腐殖型有机质而言,在 R^0 仅为0.45的阶段,地层埋深大约1000 m,微生物影响基本消失,即可形成相当数量的甲烷,到 $R^0 = 0.67\%$ 时已可形成大量甲烷。Galimov认为,正是这个阶段形成的甲烷构成了乌连戈依等白垩系的超巨型气田,

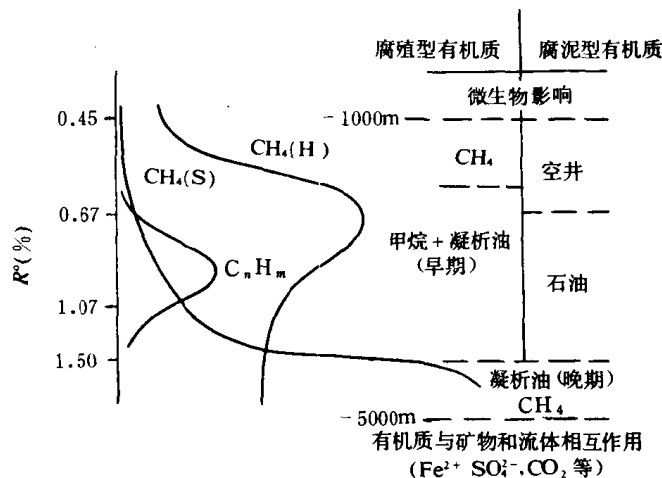


图 1-1 与有机质深成热解转化作用有关的烃分带
(Galimov, 1988)

而这些气田的储量,占世界探明天然气储量的 30%。经对比,可以看出, Galimov 所划出的低温成气带,正是过去被拒于生气门限之外的层段,和我们提出的生物-热催化过渡带气是相当的。

上文简要的描述,已大致勾画出了天然气形成的基本模式和特征,我们把它概括为多源复合、多阶连续的天然气形成模式,下文首先从多阶连续予以阐述。

天然气形成的多阶段性已为地学界普遍接受,但是,在过去的成气理论中较强调的是早干气期的生物气和晚干气期的高温裂解气。石油形成阶段虽也形成相当数量的烃类气体,但由于气溶于油,气随油迁移,此阶段气态烃形成、运移、聚集、分布的规律基本从属于石油。当然,作为一个成气阶段,不存在疑义。有人把这三个阶段,称为三个生气窗。生物-热催化过渡带气的提出就构成了自然沉积剖面上天然气各形成阶段相互衔接、连续过渡的局面。图 1-1 可以作为一个例子。从图 1-1 中可以看出,在地层埋深 1000 m 之上的层段,其 $R^o < 0.45\%$, 是生物气的成气带。生物成气带之下进入了“过渡带”,在此阶段,由腐殖型有机质在低温、微催化作用下,脂肪酸的脱羧作用、芳环化合物缩聚作用形成过渡带气。其成气强度不断加强,到 1500—2500 m 乃至 3000 m 时,成气作用将达到峰值。作为过渡带的成气作用可以算告一段落,但被埋藏的有机质继续沉降,在热催化作用下,天然气的成气作用将以相当的强度保持下去。与此同时,在 R^o 为 0.8—1.1% 的阶段, I、II 型有机质的成油和成气作用将达到较大的强度。而在 $R^o = 1.5\%$ 左右,腐泥型有机质的成气强度将急剧增加。这样一种图景,展示了烃类气体形成的阶段性。在一定埋深、一定的演化阶段,天然气形成,将以某种外生营力为主,这是我们有机成因气划为生物气、“过渡带”气、热解气、热裂解气的依据。但是如上文所述,各个阶段并非截然分开,而是互相衔接、连续演化的,这种格局,就是本节所提出的天然气形成特征之一,即多阶连续的模式。

天然气形成的上述特点,将直接反映到天然气的地球化学特征上。例如对煤型气的 $\delta^{13}C_1 - R^o$ 的经验公式, Stahl (1977) 的模式为

$$\delta^{13}C_1 = 8.6 \lg R^o - 28\%$$

而我们在 1985 年获得的经验公式为

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 8.6 \lg R^\circ - 32.8\%$$

1987 年,徐永昌等访问原联邦德国时与国外同行讨论过两个模式的差异。我们强调该差异是盆地发展史不同造成的,我们认为德国同行的模式为沉降—抬升—沉降,二次成气作用模式。沉积的间断造成连续成气作用的间断,早期(第一期的)形成的气体在源岩抬升后散失,目前保存的仅是二次成气的产物。我们所回归的煤型气模式则反映了多阶连续的模式,气藏中的煤型气是各阶段连续成气的复合,包括了成气初期具有较轻同位素组成的甲烷和成气中期较重同位素组成的甲烷。经过讨论,德国同行们同意了我们的意见。

Galimov(1988)在引用和讨论 Stahl(1977)和沈平(1987)煤型气的模式时,用较恰当的数学语言对两种模式作了评述,他认为“Stahl”的模式近似于瞬时曲线,而沈平(1987)的模式更近似于“累积”曲线。Schoell(1988)在评述 Galimov 上述成果时指出,“盆地源岩在沉降过程中,甲烷的 ^{13}C 浓度的变化是相当大的,这可能意味着甲烷的同位素组成在很大程度上取决于聚积史,即甲烷的早期圈闭和晚期圈闭,或累积的甲烷与瞬时的甲烷的关系。可以相信,甲烷的同位素变化的许多特征是由这些排放和圈闭的特定时间关系所造成的”。

关于天然气成气的连续性,鲍威尔(1987)在题为《陆相有机质生烃概念的发展》一文明确指出。“天然气可形成陆相有机质成熟作用的任何阶段,液态烃被夹带到天然气中,意味着凝析油可形成于成熟作用的任何阶段”。

综上所述,天然气形成可划分为若干成气阶段,不同阶段以某种外生营力为主,使有机质转化为气态烃。在我们划分天然气成因类型时,即以这种为主的外生营力来命名该阶段形成的天然气,我们称之为主阶定名。唯一例外的是生物-热催化过渡带的命名,由于它仅是近几年才引起重视、被明确划分出的一个生气带,一种新的成因分类,对其成气机理虽有所了解,但认识的深度不够,所以我们以上、下两个概念较明晰的成气带名称,对这个新的成气带加以框定,把这两个成气带之间的层段命名为生物-热催化过渡带。此外,由于天然气的成气作用从成岩作用早期开始呈连续不断演化,所以我们不主张天然气的形成有门限值、有几个窗的提法,也不主张对天然气的划分冠以熟、不熟、低熟、高熟等概念。但是有机质这些演化阶段,一方面对天然气的形成,的确是一种起主导作用的外生营力,另一方面天然气地质学人员对有机质演化的各个阶段有较明晰科学概念,一提这些术语,相应的科学信息就浮现脑海,所以我们常用有机演化的低熟期、成熟期、过熟期等术语来简要描述一种天然气的性质。

在强调天然气形成过程多阶连续的同时,我们倡导天然气来源的多源复合。对于天然气,目前已广为接受的来源是:(1)以无生命物质为基础的无机物来源;(2)以生命物质为基础的有机质来源,根据有机质的特征,又再分为腐泥型有机质来源和腐殖型有机质来源;(3)部分学者强调天然气形成是由于沉积层的有机质和由地球深部无机来源的氢参与下,两源物质相互作用下形成的。我们的观点是承认地球上无机来源甲烷存在的普遍性,也承认这种甲烷在特定条件下聚集成藏的潜能。对于无机来源和有机来源共同参与天然气的形成的观点,我们承认这种假说有其一定的科学依据,但是,和前一种假说相比它缺乏自然界的实例。天然气的有机来源的理论,无论是科学立论的严谨性,还是自然实例的广泛性,以及此种来源天然气的成藏规模、经济价值,都是其他任何来源的天然气无可

比拟的。我们强调的多源复合,主要是指有机来源天然气的复合性。这种复合可以是煤型气和油型气的复合,也可以是同一时代源岩、不同成因气体间的复合。如同时代源岩所形成的烃类气体和非烃气体的复合。我们强调的多源复合,也包括有机质不同演化阶段的气体,在成藏时以累集的规律或积分式储聚的复合。对此,在讨论多阶连续时,已作了必要的阐述。采用复合一词,是希望说明,这种多源气体的共储,存在某种共生复合的联系因素,我们认为,天然气形成的多源复合现象具有普遍性,是天然气形成的另一特征。这既与天然气形成的来源多有关,也与自然界这些来源本身常常难于绝对分开有关,如腐泥型有机质和腐殖型有机质分布就是如此。此外,天然气作为流体矿产,有较强的运移活性。天然气的分子小、密度小、粘度小,以及被岩石吸附的能力小的四小特征,使各种气体在岩石圈中有较强的迁移能力,使不同来源的气体在某些因素的制约下,共储于同一圈闭空间。特别是我们把不同成气演化阶段的气体,划为不同的成因类型,这些气体在一个连续沉降的盆地内,常常受流体势能的制约,共储于流体势能低的部位,形成累积式的储聚,形成多源复合的格局。当然,多源复合并不排斥一源为主,而且自然界的气藏常常是一源为主的形式存在,这也是我们可以把气藏划为煤型气、油型气(从母质来源性质分),或者确定为过渡带气、热解气的原因,我们称之为主源定型。总之,我们强调天然气形成的另一个特点是天然气形成的多源复合,并常以一源为主的形式存在。

综上所述,本节强调天然气的形成特征是“多源复合、多阶连续”天然气形成的这种特点,对于我们认识自然界天然气存在的一般规律和特殊规律都极为有益。

第三节 天然气测试技术与天然气研究

时至今日,在不少领域,科学技术已无明确的分界,或者也可以说,没有技术就没有科学。在地学研究中,技术更多地是指与实验室内各种测试、模拟相关的技术。科学则更多体现为学科的发展。在许多学科研究中,没有相关的技术,就进入不了某一相应的学科领域。为适应气体地球科学科研工作的需要,我国在相应的实验技术领域取得了长足的进展,建立和完善了气体全组分分析,气、液、固有机物的碳、氢同位素分析,轻稀有气体氮、氦同位素分析,气、液烃类碳、氢同位素标准物测试研究,以及模拟实验等技术工作。本节对书中常用的部分测试、实验技术作简要叙述。

1. 气体组分全分析

天然气的各种组分浓度及其比值,蕴含着天然气母质类型、演化程度及成因等信息,也是天然气地学研究来源最广、应用最广的资料。我们主要用色谱法测量气体的烃类和非烃组分。汞蒸气组分的测定用冷原子吸收法及金膜测汞仪,在此从略。

气体色谱组分全分析目前采用两台色谱仪,一台分析永久性气体,一台专门作烃类气分析,两台仪器用一台计算机控制,同时作同一样品分析,采用标准气定量或根据研究工作需要采用相应的组分归一方法定量。

天然气中常见的永久性气体有氮、氧、二氧化碳、硫化氢和稀有气体氮、氦等。我们采用两组色谱柱,两种载气,通过两次进样来完成分析。一组用一根填充柱,柱长1 m,内径4 mm,填充固定相5 Å分子筛,载气为高纯氮,该柱可分离出天然气中的氮、氢、氦等,用热