

石油高职高专规划教材

石油地质学

付秀清 王正东 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油高职高专规划教材

石油地质学

付秀清 王正东 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从石油和天然气的基本特征入手,系统地阐述了油气生成、油气藏形成、油气藏特征和油气分布规律等石油地质学的基本原理和基础知识,力求从理论与实践相结合的角度优化教材内容,加强了对实用性内容的讲解与训练。

本书可作为石油高职高专石油与天然气地质勘查技术、油气地质与勘查技术、区域地质调查及矿产普查、地球物理勘查技术和油气藏分析技术等专业的教材,也可作为职工培训教材和现场工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

石油地质学/付秀清,王正东主编.
北京:石油工业出版社,2009.6

石油高职高专规划教材

ISBN 978-7-5021-7163-6

I. 石…

II. ①付… ②王…

III. 石油天然气地质-高等学校:技术学校-教材

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 080630 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523574 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16

字数:407 千字

定价:25 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

石油地质学是随着人类的油气勘探活动而逐渐形成的一门应用科学,是人类在大量油气勘探实践中所获得的经验和认识的总结与升华。从1861年加拿大地质学家怀特提出著名的“背斜聚油理论”至今,历经近150年的发展,石油地质理论日臻完善,已建立了系统的油气生成、运移、聚集及分布的理论体系,并有效地指导了人类的油气勘探活动。石油地质学知识一直以来都是油气地质与勘探工作者必须掌握的学科知识。

本书在编写过程中遵循“立足现场、注重实用、层次清楚、论述简洁、难度适中”的原则,以岗位技能要求为基础优化教材内容,避免庞杂繁琐的理论阐述,加强教材的实用性、适用性和可读性,力求使教材能够充分体现职业教育的特点。

本书围绕成烃、成藏和油气分布规律三大石油地质的核心内容,按照事物发生、发展的顺序展开论述,建立了“正演”顺序的教材内容体系。第一章介绍油、气、水的基本特征;第二章阐述烃类生成及烃源岩评价;第三章、第四章和第五章论述圈闭及其构成要素的特征和油气运移、聚集成藏的基本原理;第六章讲述油气藏类型及特征;第七章、第八章介绍油气聚集单元、油气分布特征及主要控制因素、油气资源评价的基本内容及方法。

为强化对学生职业技能的培养,本书在附录中设置了十项实训项目,包括了油气生成、运移、圈闭与成藏等各个方面的技能训练,基本涵盖了石油地质的核心内容。通过这些项目的训练,可以帮助学生进一步理解和巩固石油地质理论知识,提高编图、识图和综合分析解决石油地质问题的能力,为学生毕业后尽快胜任职业岗位奠定良好的基础。

本书由付秀清、王正东任主编,李书森、孙新铭任副主编。

参加编写的人员分工如下:绪论、第三章、附录由天津工程职业技术学院付秀清编写;第一章、第四章由渤海石油职业学院刘冬梅、孙建华编写;第二章由天津石油职业技术学院王锦编写;第五章、第八章由辽河石油职业技术学院王正东、白旭红编写;第六章由克拉玛依职业技术学院孙新铭编写;第七章由天津石油职业技术学院李书森编写。全书由付秀清统稿完成。

本书可作为石油高职高专石油与天然气地质勘查技术、油气地质与勘查技术、区域地质调查及矿产普查、地球物理勘查技术和油气藏分析技术等专业的教材,也可作为职工培训教材和现场工程技术人员的参考用书。

本书在编写过程中得到了各参编院校及其所在油田的大力支持,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2009年2月

目 录

绪论	(1)
第一节 石油地质学的形成与发展概况	(1)
第二节 石油地质学的任务与内容	(2)
第三节 石油地质学与其他学科的关系	(4)
第四节 我国油气资源勘探发展概述	(4)
第一章 油气藏中的流体	(8)
第一节 石油	(8)
第二节 天然气	(17)
第三节 油田水	(20)
本章小结	(26)
复习思考题	(26)
第二章 石油与天然气的生成	(27)
第一节 油气生成的物质基础	(27)
第二节 油气生成的外部条件	(31)
第三节 油气生成	(35)
第四节 烃源岩特征及评价	(42)
本章小结	(59)
复习思考题	(59)
第三章 储集层和盖层	(60)
第一节 储集层岩石的基本特性	(60)
第二节 碎屑岩储集层	(66)
第三节 碳酸盐岩储集层	(73)
第四节 其他岩类储集层	(82)
第五节 盖层	(86)
本章小结	(88)
复习思考题	(88)
第四章 石油和天然气的运移	(90)
第一节 油气运移概述	(90)
第二节 油气的初次运移	(91)

第三节 油气的二次运移	(99)
本章小结	(108)
复习思考题	(108)
第五章 油气聚集与成藏	(109)
第一节 圈闭与油气藏	(109)
第二节 油气藏形成的基本条件	(113)
第三节 油气藏的形成	(120)
第四节 油气成藏年代的确定	(132)
本章小结	(136)
复习思考题	(136)
第六章 油气藏类型及特征	(138)
第一节 油气藏分类原则	(138)
第二节 构造油气藏	(141)
第三节 地层油气藏	(161)
第四节 岩性油气藏	(168)
第五节 复合油气藏	(176)
第六节 油气藏内的压力、温度及油气水分布	(180)
本章小结	(188)
复习思考题	(188)
第七章 油气聚集单元及油气分布	(189)
第一节 含油气盆地	(189)
第二节 含油气区、油气聚集带和油气田	(195)
第三节 油气分布	(198)
第四节 中国含油气盆地简介	(205)
本章小结	(208)
复习思考题	(208)
第八章 油气资源评价	(209)
第一节 油气资源概念与分级	(209)
第二节 油气资源评价概述	(211)
第三节 油气储量计算	(214)
本章小结	(218)
复习思考题	(218)
附录 石油地质实训	(219)
实训一 含油岩石的观察及含油性实验	(219)

实训二	烃源岩有机质成烃阶段的划分	(222)
实训三	“TTI”法确定油气生成时间	(223)
实训四	有利生油区的分析评价	(225)
实训五	储集岩有利分布区分析评价	(229)
实训六	油源及油气运移方向的分析判断	(230)
实训七	圈闭和油气藏分析	(233)
实训八	构造图和砂岩等厚图的编绘与圈闭分析	(239)
实训九	成藏条件分析	(240)
实训十	石油储量计算	(243)
参考文献	(247)

绪 论

第一节 石油地质学的形成与发展概况

石油地质学是石油和天然气地质学的简称,是研究石油和天然气在地壳中生成、运移、聚集和分布规律的学科。

石油地质学是随着人类的油气勘探活动而诞生的一门应用学科。通过大量的勘探和开采实践,人们积累了很多有关油气生成、运移和聚集规律的认识,逐渐形成了这门学科,并在之后的勘探实践中不断发展和完善这门学科。

一直以来,人们对油气成因的认识基本上可归纳为无机成因说和有机成因说两大学派。无机成因说认为石油及天然气是在地下深处高温、高压条件下由无机物通过化学反应形成的;有机成因说主张油气是在地质历史上由分散在沉积岩中的动物、植物有机体转化而成的。

在有机成因说与无机成因说的长期激烈争论中,有机成因说提供了很多重要证据,使其理论不断得到修正、补充和完善。1943年,怀特莫尔等根据从海藻中分离出含有19~34碳原子的一系列烃类的事实指出,海洋有机体一年所提供的6000万桶烃类足够形成在沉积岩中所发现的总烃量。1952年,史密斯通过对现代海洋沉积物中烃的研究指出,近代海洋沉积物中存在游离烃,在成岩早期阶段,随着埋藏深度加大,烃含量急剧增加,非烃含量则显著减少,从而进一步完善了有机生油理论。1963年,埃布尔森提出了干酪根成油说,认为石油是沉积物中的干酪根在成岩过程的晚期经过热解生成的,该理论已成为目前油气生成最重要的理论。20世纪80年代后期,未熟—低熟油理论、煤成烃理论的提出和发展,使油气有机生成理论更趋完善,我国学者对此作出了突出贡献,开辟了油气勘探的新领域。

与此同时,无机成因说也在不断发展。1876年,俄国化学家门捷列夫提出石油无机成因的“碳化物说”,认为地球上分布广泛的碳和铁在地球形成时有可能形成金属碳化物——碳化铁,当它与沿着裂缝渗入到地壳深处的炽热的水相遇时,就可以生成碳氢化合物。20世纪50年代,苏联学者库德里扬采夫提出“岩浆起源说”,认为石油是岩浆中的碳元素和氢元素在岩浆逐渐冷却过程中发生化学反应形成的。随着宇宙化学和地球形成新理论的兴起、板块构造理论的发展和应用以及同位素地球化学研究的深入,为油气无机生成学派提供了理论依据,又出现了地幔脱气说、费—托合成说等新假说。

虽然目前油气有机成因理论日臻完善,在油气勘探实践中发挥了重要作用,但不能由此否定油气无机成因理论的科学价值。到目前为止,国际上对石油的成因问题尚未得出定论。

19世纪中期,俄国(1848年在比比—埃巴特)、美国(1859年在宾夕法尼亚州)相继钻成了各自的第一口产油井,标志着近代石油工业的开始。当时找油的主要依据是地面油气苗,即在具有地面油气苗的位置上或其附近钻井。随着油气勘探的不断进行,地质学家们发现油气常常聚集于背斜的高点位置。1861年,加拿大地质学家怀特提出了著名的“背斜聚油理论”,此后,该理论一直为地质学家所遵循,指导着油气勘探的决策并获得了巨大的成功。

进入 20 世纪后,背斜学说已成为石油勘探公司普遍接受的石油地质理论。1917 年,美国石油地质家协会(AAPG)成立,AAPG 会刊出版,标志着石油地质学的诞生,石油地质学家从此正式走上油气勘探的舞台。

20 世纪 30 年代,美国发现了巨大的东得克萨斯地层油藏,这使地质学家们认识到不能简单地只靠背斜理论找油。为寻找新油田,除了应用构造制图外,还必须广泛地采用地层学方法。因此,在石油地质理论中引入了礁、不整合、逆倾斜的尖灭、三角洲沉积、岩相制图等与地层和岩性圈闭有关的概念,并逐渐形成了找油的圈闭理论。

自 20 世纪 80 年代以来,石油地质学家运用先进的油气勘探技术和方法以及计算机技术、物理模拟技术等,系统地研究油气成藏的各项条件、机制及其相互关系,逐步发展形成了诸如流体封存箱、含油气系统、成藏动力学等油气成藏新兴理论。

自 20 世纪 70 年代以来,许多石油地质学家和地球化学家根据盆地类型、沉降史、沉积史、干酪根类型及其成熟度建立石油生成模型,以便在空间和时间上定量地确定每一层油源岩的生烃潜力。1975 年,蒂索等首次介绍了石油生成与地质时间呈函数关系的石油生成模型。1983 年,迪朗基于达西定律和相对渗透率概念,描述了二维二相单元数学运移模型,该模型提供了埋藏过程中沉积物孔隙的石油饱和度史和流体压力史,指出了石油运移的时间及油藏形成的可能部位。尽管这些研究工作还不够成熟,但石油地质学家们的努力使得石油地质理论已开始走向定量化和模式化。

从近代石油工业诞生至今,经过反复的勘探实践—认识—再勘探—再认识,已逐渐形成了日臻完善的油气地质理论,建立了系统的油气生成、运移、聚集及分布的理论体系。然而,科学的发展是无止境的。当今世界,未经勘探的处女地已所剩无几,容易寻找的油气田大多已被发现,向新的深度(深层)、新的领域(天然气、非常规气、非构造油气藏)进军是当今油气勘探的总趋势。这种形势将迫使我们不断发展新的石油地质理论和油气勘探技术,以适应现代油气勘探形势的需要与发展。

第二节 石油地质学的任务与内容

众所周知,石油与天然气在国民经济中占有极其重要的地位,是工业的“血液”或“粮食”。它们既是燃料,也是润滑油料及化工原料。目前已经能够从石油中提炼出 3000 多种产品,如三大合成材料、各种农药、医药、纺织甚至一些无机化工原料(氨及硫黄)等均离不开石油。可以说,没有石油,就没有工业和人类社会的现代化。

在当今社会,随着国民经济的快速发展和社会的不断进步,人们对石油及其产品的需求也与日俱增。这就要求石油地质工作者要不断提高勘探效率,更快地找到更多油气资源,查明其大小及分布,并高效地将其开采出来。

然而,石油和天然气深埋地下几百至数千米,控制油气分布的地质条件复杂多变,油气又是流体,可以在地壳中运移,其现在储存的地方一般并不是它当初生成的地方,这些都给油气勘探带来极大困难。那么,油气藏是如何形成的?哪些因素控制着地壳上油气资源的分布?我们应该到何处去寻找油气藏?如何进行油气资源的评价?这些都是石油地质学所要回答的主要问题,也是石油地质学的主要任务。

石油地质学的任务决定了它要研究油气在地壳中的生成、运移、聚集成藏、保存条件与油气分布规律等理论内容,主要包括:石油、天然气、油田水的基本特征,储集层和盖层,油气生

成、运移和聚集成藏原理,油气藏的类型及特征,油气聚集单元与分布规律,油气资源评价等。

从职业能力分析的角度可以将石油地质学内容划分为四个综合技能模块,即生烃分析模块、成藏分析模块、油气藏特征分析模块和油气资源评价模块。每个综合技能模块由若干专项技能构成。综合(专项)技能与课程内容的对应关系见表0-1。

表0-1 石油地质课程结构与内容开发表

综合技能	专项技能	相关知识	对应章节
生烃分析	油气生成的物质条件分析	油气生成原始物质、干酪根	第二章 石油与天然气的生成
	油气生成的地质环境分析	大地构造条件、古地理条件、古气候条件	
	油气生成的物理化学条件分析	温度与时间、细菌活动、催化作用和压力作用	
	油气生成过程分析	有机质演化与成烃模式、低熟油的形成	
	烃源岩层特征及评价	烃源岩层的岩性和岩相特征、烃源岩层的地球化学评价、门限深度的确定、生油量估算	
	油源对比	油源对比常用指标与方法	
成藏分析	储集层分析	岩石的孔渗性、碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层	第三章 储集层和盖层 第四章 石油和天然气的运移 第五章 油气聚集与成藏
	盖层分析	盖层类型及其封盖机制	
	生储盖组合及评价	生储盖组合类型、生储盖组合评价	
	圈闭及其有效性分析	圈闭的基本概念及度量、有效圈闭的特点	
	油气运移分析	油气的初次运移、油气的二次运移	
	油气聚集成藏及保存条件分析	油气藏的概念及度量、油气藏形成的基本条件、油气在单一圈闭中的聚集、油气的差异聚集、油气藏的演变	
	成藏年代的确定	根据盆地沉降史、圈闭发育史和生排烃史确定油气藏形成时间;根据饱和压力确定油气藏形成时间	
油气藏特征分析	油气藏流体特征分析	石油与天然气的成分和性质、油田水的成分和性质、油气水资料的用途	第一章 油气藏中的流体 第六章 油气藏类型及特征
	构造油气藏特征分析	背斜油气藏、断层油气藏、岩体刺穿油气藏、裂缝性油气藏	
	地层油气藏特征分析	地层不整合遮挡油气藏、地层超覆油气藏	
	岩性油气藏特征分析	岩性尖灭油气藏、透镜体油气藏、生物礁油气藏	
	复合油气藏特征分析	构造—地层复合油气藏、构造—岩性复合油气藏、构造—水动力复合油气藏	
	油气藏的温度与压力特征分析	油气层压力的概念及来源、原始油气层压力、折算油气层压力、地温梯度、地温级度	
油气资源评价	含油气盆地认识	含油气盆地的概念及类型、沉积盆地内的构造单元	第七章 油气聚集单元及油气分布 第八章 油气资源评价
	油气聚集单元划分	含油气区、油气聚集带、油气田、油气藏	
	油气分布特征认识	油气分布特征、油气分布的主要控制因素、我国的主要含油气盆地	
	油气资源评价	油气资源的概念与分级、油气资源评价的层次、油气资源评价的基本内容及方法、油气储量计算	

职业教育培养的是在各行业一线工作的应用型人才。要实现这一目标,要求职业教学活动必须有明确的岗位导向性,教学内容要具有实用性和针对性。明确石油地质学课程内容与职业技能的对应关系,将有助于正确把握本门课的教学方向,在教学过程中从技能学习的角度组织和实施教学,从而加强教学的目的性和技能针对性,有效提高学生的职业能力。

第三节 石油地质学与其他学科的关系

石油地质学与多种学科有密切的关系,包括流体力学、有机地球化学、地球物理学、生物学、构造地质学、沉积岩石学和岩相古地理学等。例如,储集层是形成油气藏的基本条件之一,各种类型的储集砂体的分布受沉积体系的控制,要确定储集层分布的有利地带,进而找到油气富集区,就必须进行沉积岩与岩相古地理方面的分析研究,这就需要运用沉积岩与沉积相方面的知识;再如,油气的运移和聚集受益地区域构造和局部构造条件的控制,要想成功地找到与背斜构造、断裂构造以及不整合面有关的油气田和油气聚集带,就必须掌握有关构造地质学的知识,等等。

实验分析技术是石油地质学研究的重要手段。例如,色谱、色谱—质谱、红外光谱、电子显微镜和同位素分析等的广泛采用,为烃源岩的地球化学研究创造了良好的条件。

总之,石油地质学是一门以地质学为基础、多学科综合的学科,也是一门应用性很强的学科。它对其他学科的依赖远超过其他学科对地质学的依赖。

第四节 我国油气资源勘探发展概述

一、我国古代对油气的发现、开采与利用

我国是世界上最早发现石油及天然气的国家。据史料记载,在距今 2700 多年前西周朝代的《易经》中就有“泽中有火”、“上火下泽”的记载,是指天然气在湖泊池沼水面上起火燃烧的现象。石油的最早记载见于我国东汉史学家班固(公元 32—92 年)所著《汉书·地理志》中,书中记有“高奴,有洧水,可蘸”。高奴在今陕西省延长一带,“洧(音谓)水”是今延河的一条支流,“蘸”乃古代“燃”字,这是指水面上有像油一样的东西可以燃烧。

我国采集和利用石油及天然气有十分悠久的历史,特别是通过钻凿油井和气井开采石油和天然气的技术在上世界上也是最早的。据史料记载,从 2000 多年前的秦朝开始,我国人民就陆续在陕西、甘肃、新疆、四川、华北、山东、广东、台湾等地发现了石油和天然气,并加以采集和利用。

公元 267 年晋代张华所著的《博物志》中记载了从秦代开始四川就凿井采气煮盐的情况:“临邛火井一所,纵广五尺,深二三丈”;“先以家火投之”,再“取井火还煮井水”;“一斛水得四五斗盐”。随着凿井采气煮盐,钻井技术也得到迅速发展。公元前 256—前 251 年,秦朝李冰发明了顿钻,并在四川广都成功打出了第一口采盐井,随后在邛崃出现了用顿钻钻凿的天然气井。至东汉时期,钻井工具和方法已有了很大改进。据《蜀中广记》记载,“蜀始开筒井,用环刃凿如碗大,深者数十丈”,说明当时的人们已经拥有了比较高的钻井技术。

我国是世界上最早开发气田的国家。四川自流井气田的开采已有约 2000 年的历史。《自

流井记》关于“阴火潜燃于炎汉”的记载表明,早在汉朝就已在自流井发现了天然气。宋末元初时(13世纪),已大规模开采自流井的浅层天然气。到了明末清初时,已逐渐形成了气田地质专业队伍,勘定井位,研究井下油气地质情况,分析天然气、卤水储集规律。当时的钻井技术已发展成一套完整的工艺技术,达到较高的技术水平。1835年钻成的兴海井井深已达1001.43m,是世界上第一口千米井,日产气5000~8000m³。1840年钻成的磨子井在1200m深处钻达今三叠系嘉陵江统石灰岩第三组深部主气层,发生强烈井喷,火光冲天,号称“火井王”,估计日产气量超过40×10⁴m³。

我国也是世界上最早开采和利用石油的国家之一。据《博物志》中记载:“酒泉延寿县南山出泉水,大如笱,注地为沟,水有肥,如肉汁,取著器中,始黄后黑,如凝膏,然极明,与膏无异,膏车及水碓甚佳,彼方人谓之石漆。”这说明当时人们称石油为“石漆”,已经开始对其采集并用作燃料及照明。

据元朝李兰兮等所著《元一统志》记载:“在延长县南迎河有凿开石油一井,其油可燃,兼治六畜疥癣,岁纳壹百壹拾斤。又延川县西北八十里永平村有一井,岁办肆百斤入路之延丰库。”这表明在元朝时已有油井生产,而且还建立了管理机构。

我国古代人民以其勤劳、勇敢和智慧,在认识、利用和开采石油及天然气资源方面一直走在世界前列,积累了丰富的知识和宝贵的经验。明朝科学家宋应星(1587—1661)所著的科学巨著《天工开物》把长期流传下来的石油化学知识作了全面的总结,对石油的开采工艺作了系统的叙述,全书18卷,图文并茂,是当时世界上仅有的一部化学工艺百科全书。我国古代石油开采的许多技术环节和技术项目皆有赖于此书而得以流传,并逐渐流传到国外,给人类留下了一笔极其珍贵的文化遗产。

二、我国近现代的油气资源勘探

我们的先民在开采和利用石油天然气技术上曾经创造了光辉灿烂的成就,但在1840年鸦片战争以后,由于帝国主义的侵略,中国沦为半封建半殖民地国家,帝国主义的经济侵略和文化侵略扼杀了我国的民族工业。从19世纪中叶近代石油工业诞生至新中国成立前的100年时间里,我国的石油勘探开采业发展极为缓慢。

1877年,清政府从美国购进新式钻机,聘请美国技师,在台湾省苗栗出磺坑钻凿油井。这是中国近代史上第一次使用新式机器钻探油井。至1885年,在出磺坑共钻凿5口井,其中一口井出油。1907年,陕西延长石油官厂成立,聘请日本技术工匠,用蒸汽动力钻机在延长县城西门外钻成延1井,日产原油1~1.5t。这是大陆地区使用新式钻机钻成的第一口油井。随后,新疆用俄国设备及俄国工匠在独山子开掘油井。1914年,北洋军阀政府同美国签订了《中美合办油矿合同》,与美孚石油公司一起在陕北地区钻探石油。1914—1916年间,美孚石油公司在延长等地共钻井7口,均未获得有工业开采价值的石油。抗战期间,国民党政府在四川、甘肃等地进行了有限的石油勘探工作,并发现了石油沟、圣灯山两个气田。1938年,地质学家孙健初等人在甘肃玉门进行了艰苦的石油地质调查工作,于1939年8月11日打出了第一口油井,发现了老君庙油田。

直到1949年新中国成立时,我国石油工业的基础仍然极其薄弱。除两处清朝时期发现的油田外,仅有老君庙和独山子两处油田,以及四川圣灯山、石油沟两处气田。全国只有两个地质调查队,几十名石油地质勘探和钻采工程人员,90%以上的国土面积没有进行过石油地质调查。从1877年到1949年的72年间,总共钻井169口,仅生产原油308×10⁴t,天然气约12×10⁸m³。

我国石油工业真正进入发展的轨道是在新中国成立后。在中国共产党的领导下,经过几代石油工作者的艰苦奋斗,我国石油工业取得了辉煌的成就。回顾新中国的油气勘探历程,大致可分为以下三个阶段。

1. 发展起步阶段

20世纪50年代,我国油气勘探的重点在西部地区的准噶尔、柴达木、吐鲁番、酒泉、四川等盆地,先后发现了克拉玛依、冷湖、鸭儿峡、阳高寺等中小型油气田。到20世纪50年代末,全国已初步形成玉门、新疆、青海、四川4个石油天然气基地,使我国石油工业面貌发生了很大变化。1959年全国原油产量达到了 $373.3 \times 10^4 \text{t}$ 。同时,在我国东部、中部等地区也逐步开展了石油勘探工作。

2. 快速发展阶段

1959—1978年,是我国油气勘探大发展的阶段。1959年9月26日,黑龙江省松辽盆地松基3井获工业油流,从而发现了世界级的大油田——大庆油田,实现了我国石油工业发展史上历史性的重大突破。由此,我国石油勘探重点由中西部地区转向东部地区,在渤海湾地区开展了大规模的石油勘探工作,相继发现了辽河、大港、任丘、胜利、潜江、南阳、中原等大中型油气田,原油产量迅速增长。到1978年,我国原油产量突破 $1 \times 10^8 \text{t}$ 大关,使我国跃居世界主要产油国家的行列。

3. 稳步发展阶段

1978年至今,是我国油气勘探稳步发展阶段。这一阶段,油气勘探从陆上至海上全面展开,同时积极开拓海外石油勘探开发市场。东部地区在老油田滚动勘探开发的同时,积极开展新区勘探,石油探明储量不断增加,保障了东部油区稳定发展。西部地区加快了对塔里木、吐哈、准噶尔、柴达木和鄂尔多斯等盆地的勘探步伐,探明了轮南、吐哈、石西、彩南等一大批油气田,保证了我国原油产量的稳定增长。中部地区在新理论、新方法、新技术的指导下,发现了一批中小型油气田。与此同时,我国海洋石油勘探也蓬勃发展,在莺歌海、北部湾、珠江口、东海、渤海等海域,发现了流花11-1、崖13-1、绥中36-1等一大批油气田。海洋石油产量迅速增长,1996年超过 $1500 \times 10^4 \text{t}$,2003年达到 $3336 \times 10^4 \text{t}$,成为保持我国石油产量增长的主要领域。在海外石油勘探开发市场的开拓上,目前在南美、中亚、非洲、中东等地区已取得重要成果。

截至2004年,已在全国25个省、市、自治区和近海海域发现了688个油气田,形成了东北、华北、鄂尔多斯、鄂豫、西南、西北和南海7个自然油区,建成了大庆、胜利、辽河、新疆、四川、长庆、渤海和南海等24个油气生产基地。全国原油产量从1949年的 $12.1 \times 10^4 \text{t}$ 增至2007年的 $1.87 \times 10^8 \text{t}$,居世界第五位。在天然气勘探开发方面成果卓著,2007年天然气产量达到 $688.53 \times 10^8 \text{m}^3$,跻身世界前十,列第九位。

在大量油气勘探实践的基础上,我国石油地质工作者在学习引进国外先进经验和理论的同时,不断总结和发展符合中国特点的石油地质理论,建立了一套比较完整的符合我国地质特征的陆相石油地质理论,包括含油气盆地分类理论、陆相生(聚)烃理论、复式油气聚集理论、低熟油理论、煤与煤系地层成烃理论等,形成了与世界海相生烃理论并驾齐驱的理论体系,有效地指导了我国的油气勘探工作。20世纪50—60年代,陆相有机质生烃、聚烃理论指导发现了克拉玛依油田和大庆油田;60—70年代,复式油气聚集区带成油理论促进了渤海湾盆地断块油气藏勘探的加速发展;80年代以来,由于未成熟—低成熟石油形成理论、煤系生油理论、盆地成藏动力学和层序地层学理论的应用,拓展了油气勘探新领域,在四川盆地、鄂尔多斯盆

地、塔里木盆地、柴达木盆地相继发现了一批大气田,促进了我国石油工业持续稳定发展。陆相盆地石油地质理论的不断发展和完善,提升了石油地质学的整体水平,大大提高了含油气盆地的勘探成效,有效促进了中国乃至世界石油与天然气勘探事业的发展。

三、我国油气资源勘探前景

我国有大大小小的沉积盆地 500 多个,沉积岩面积约 $670 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中陆上面积 $520 \times 10^4 \text{ km}^2$,近海大陆架面积 $150 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在这些盆地中,既有挤压型的前陆盆地,又有张型盆地和过渡型的克拉通盆地;既有发育在古生代稳定地台上的海相沉积盆地,又有中生代陆相断陷、拗陷沉积盆地。多种类型的沉积盆地和广大的沉积岩面积为我国油气勘探提供了广阔的空间。从已发现的油气储量来看,中生界、新生界的石油和天然气储量分别占到石油总储量的 89% 和天然气总储量的 54%,其产层以白垩系、古近系、新近系为主,三叠系、侏罗系次之。因此,中生代、新生代陆相沉积盆地在我国石油工业的发展中占有更重要的地位。

根据 2003 年开始的新一轮中国油气资源评价结果,我国石油远景资源量为 $1086 \times 10^8 \text{ t}$,地质资源量为 $765 \times 10^8 \text{ t}$,可采资源量为 $212 \times 10^8 \text{ t}$,勘探进入中期;天然气远景资源量为 $56 \times 10^{12} \text{ m}^3$,地质资源量为 $35 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量为 $22 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探处于早期。评价结果表明,我国石油储量产量进入平稳增长阶段,天然气储量产量进入快速增长阶段;到 2030 年,石油产量可以保持在 $2 \times 10^8 \text{ t}$ 水平,天然气产量可以达到 $2500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这说明我国石油工业发展的资源基础仍十分雄厚,油气勘探前景广阔。21 世纪的石油工业将继续保持快速发展势头,仍将是国民经济发展的重要支柱产业。

第一章 油气藏中的流体

【内容摘要】本章系统地介绍了石油的族分、组分及馏分组成,石油的物理性质,天然气的化学组成和物理性质,油田水的化学组成及水型划分,以及油田水资料在油气勘探开发中的应用等内容,较为全面地阐述了油气藏中各种流体的特征及其状态。

第一节 石 油

石油、天然气及其固态衍生物统称为石油沥青类。它们同煤类、油页岩、自然硫都是自然界常见的可燃矿产。由于这些矿产多由古代的动物、植物遗体演变而来,属有机成因,又具有燃烧能力,所以人们将其总称为可燃有机矿产或可燃有机岩。

可燃有机矿产的种类很多,分布很广,按其物理状态可分为气态的、液态的和固态的三类,而石油是液态可燃矿产的代表。

一、石油的化学成分

石油是由各种碳氢化合物与少量杂质组成的液态可燃有机矿产,其主要成分是液态烃。因受诸如原始有机质、形成条件、保存条件等多种因素的影响,石油的组成和性质变化很大。石油没有固定的成分,因此石油没有确定的物理参数,其物理性质主要取决于它的化学组成。

1. 石油的元素组成

1) 主要元素

组成石油的元素主要是碳(C)和氢(H),其次是硫(S)、氮(N)、氧(O)。石油中碳的含量一般为84%~87%,氢的含量一般为11%~14%,两者以烃的形态出现,占石油成分的97%~99%。

大多数石油含硫量小于1%,如我国任丘油田为0.33%~0.43%;少数含硫量大于1%,如墨西哥石油高达3.6%~5.3%。根据含硫量可把石油分为高硫石油(含硫量大于1%)和低硫石油(含硫量小于1%)。

石油中氮的含量一般比硫的含量低得多,大多数石油含氮量小于0.2%,均值为0.094%;少数石油含氮量可达0.5%以上。通常以0.25%为界把石油分为贫氮石油和高氮石油。

石油中氧的含量一般在0.1%~4.5%之间,很少超过1%。氧主要富集在石油高沸点馏分中,其含量与石油的次生变化程度有关。

2) 微量元素

除上述五种元素外,石油中还含有其他微量元素,构成了石油的灰分,其含量变化从十万分之几到万分之几。它们与自然界有机质中的微量元素组成十分相近,被作为石油有机成因的证据之一。

利用发射光谱法和中子活化分析法从石油灰分中发现了59种微量元素,常见的有铁(Fe)、钙(Ca)、镁(Mg)、硅(Si)、铝(Al)、钒(V)、镍(Ni)、铜(Cu)、锑(Sb)、锰(Mn)、锶(Sr)、

钡(Ba)、硼(B)、钴(Co)、锌(Zn)、钼(Mo)、铅(Pb)、锡(Sn)、钠(Na)、钾(K)、磷(P)、锂(Li)、氯(Cl)、铋(Bi)、铍(Be)、锗(Ge)、银(Ag)、砷(As)、镓(Ga)、金(Au)、钛(Ti)、铬(Cr)、镉(Cd)等。

在这些微量元素中,钒(V)和镍(Ni)两种微量元素的分布最普遍并且具有成因意义,可通过钒镍比值(V/Ni)区别石油是海相还是陆相成因、进行油源对比等。海相成因石油中钒含量高(V/Ni > 1),而陆相石油中镍含量高(V/Ni < 1)。

2. 石油的化合物组成

碳和氢两种主要元素组成各种碳氢化合物存在于石油中,在实验室中用液相色谱可将石油划分为烃类化合物(正构烷烃、异构烷烃、环烷烃、芳香烃)、非烃化合物及一部分沥青质。

1) 烃类化合物

石油中烃类有很多种。按结构的不同分为三类:烷烃、环烷烃和芳香烃。其中烷烃与环烷烃为饱和烃,芳香烃为不饱和烃。

(1) 烷烃。

烷烃通式为 C_nH_{2n+2} ,属饱和烃,其中 n 表示 C 的个数。在常温常压下,含 1~4 个碳原子($C_1 \sim C_4$)的烷烃为气态;含 5~16 个碳原子($C_5 \sim C_{16}$)的直链烷烃呈液态;17 个碳原子(C_{17})以上的高分子烷烃皆呈固态。烷烃的沸点、熔点、密度等物理性质均随相对分子质量的增大而升高,所有烷烃的相对密度都小于 1,除气态烃外几乎不溶于水(表 1-1)。

表 1-1 正烷烃的物理常数(据张厚福等,1999)

名称	分子式	熔点,℃	沸点,℃	相对密度(液态时)	物质通常状态
甲烷	CH ₄	-182.6	-161.6	0.424	气
乙烷	C ₂ H ₆	-182.1	-88.6	0.546	气
丙烷	C ₃ H ₈	-187.1	-42.2	0.582	气
丁烷	C ₄ H ₁₀	-138.0	-0.5	0.579	气
戊烷	C ₅ H ₁₂	-129.7	36.1	0.626	液
己烷	C ₆ H ₁₄	-95.3	68.8	0.659	液
庚烷	C ₇ H ₁₆	-90.3	98.4	0.684	液
辛烷	C ₈ H ₁₈	-56.8	125.6	0.703	液
壬烷	C ₉ H ₂₀	-53.7	125.6	0.703	液
癸烷	C ₁₀ H ₂₂	-29.7	174.0	0.718	液
十一烷	C ₁₁ H ₂₄	-25.6	195.8	0.740	液
十二烷	C ₁₂ H ₂₆	-9.7	216.2	0.750	液
十三烷	C ₁₃ H ₂₈	-6.0	235.5	0.756	液
十四烷	C ₁₄ H ₃₀	5.5	251.0	0.764	液
十五烷	C ₁₅ H ₃₂	10.0	268.0	0.769	液
十六烷	C ₁₆ H ₃₄	18.1	280.0	0.775	液
十七烷	C ₁₇ H ₃₆	22.0	303.0	0.777	固
十八烷	C ₁₈ H ₃₈	28.0	300.0	0.778	固
十九烷	C ₁₉ H ₄₀	32.0	330.0	—	固
二十烷	C ₂₀ H ₄₂	36.0	—	—	固

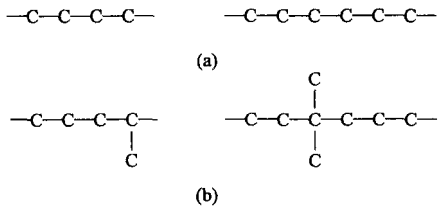


图 1-1 正构烷烃和异构烷烃结构示意图
(a) 正构烷烃; (b) 异构烷烃

烷烃分子结构特点是 C 原子与 C 原子都以单键 C—C 相连, 排列成直链式。其中无支链者为正构烷烃或正烷烃; 有支链者为异构烷烃或异构烃 (图 1-1)。

在石油中, 不同碳原子数的正构烷烃的相对含量呈一条连续的分布曲线, 称正构烷烃分布曲线, 这说明石油中正构烷烃同系物是一个连续系列。

正构烷烃分布曲线的特征与成油的原始有机质类型、成油环境以及有机质的成熟度等因素密切相关, 不同石油的正构烷烃分布曲线特征是不同的。一般陆源有机质形成的石油高碳数 (C_{23} 以上) 正构烷烃含量高, 海生低等浮游生物形成的石油低碳数 (C_{22} 以下) 的正构烷烃居多。有机质演化成熟度较高、年代较老、埋藏较深的石油低碳数正构烷烃居多; 演化程度低的石油正构烷烃碳数偏大。此外, 受微生物强烈降解的石油正构烷烃的含量低, 低碳数的正构烷烃就更低。因此, 正构烷烃分布曲线特征较多应用于研究石油的成因和油源对比。

石油中的异构烷烃以类异戊二烯型烷烃最重要, 其特点是在直链上每 4 个碳原子有 1 个甲基支链。一般认为它是由天然色素或萜烯类衍生的产物, 因而它是石油为生物成因的标志化合物。同源的石油所含类异戊二烯型烷烃的类型和含量都十分接近, 因此, 常用于油源对比标志 (指纹化合物), 近来也用于沉积环境研究。

在沉积物和原油中的类异戊二烯型烷烃以植烷、姥鲛烷、降姥鲛烷、异十六烷及法呢烷的含量最高 (图 1-2), 其中又以姥鲛烷 (Pr)、植烷 (Ph) 最重要, 常用 Pr/Ph 、 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 作为油源对比指标。

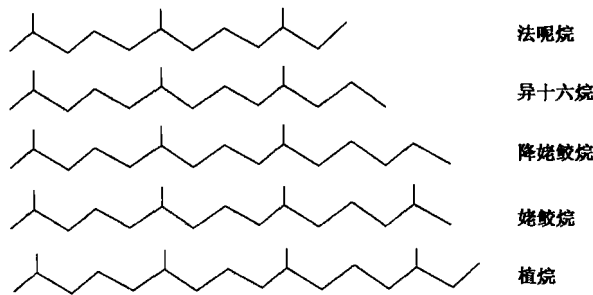


图 1-2 常见类异戊二烯型烷烃结构图

表 1-2 为我国一些油田的原油中类异戊二烯型烷烃的分布特征。可以看出, 不同油田 (地区) 或不同层位的原油, 由于油源不同, 各种类异戊二烯型烷烃的含量存在很大差异。

表 1-2 某些油田原油中类异戊二烯型烷烃的分布 (据张厚福等, 1999)

油田或地区	产层时代	植烷 (Ph), %	姥鲛烷 (Pr), %	降姥鲛烷, %	异十六烷, %	法呢烷, %
任丘	Zw	47.7 ~ 62.0	19.3 ~ 28.8	7.0 ~ 11.8	5.2 ~ 9.8	2.0 ~ 6.5
川南	Tc	21.9 ~ 22.8	21.3 ~ 29.7	17.6 ~ 22.9	18.6 ~ 28.7	6.9 ~ 15.4
孤岛	Ng	40.6 ~ 43.0	24.5 ~ 27.5	14.4 ~ 16.7	10.9 ~ 12.9	4.4 ~ 5.2
义和庄	Es	31.7 ~ 46.9	23.8 ~ 40.1	9.81 ~ 1.4	8.0 ~ 12.7	4.2 ~ 6.3
渤海	E	19.3 ~ 22.1	24.8 ~ 27.4	16.4 ~ 17.9	19.6 ~ 26.4	10.6 ~ 15.6
川中	J	22.0 ~ 22.8	35.1 ~ 38.8	15.3 ~ 15.8	16.3 ~ 19.3	7.0 ~ 7.7