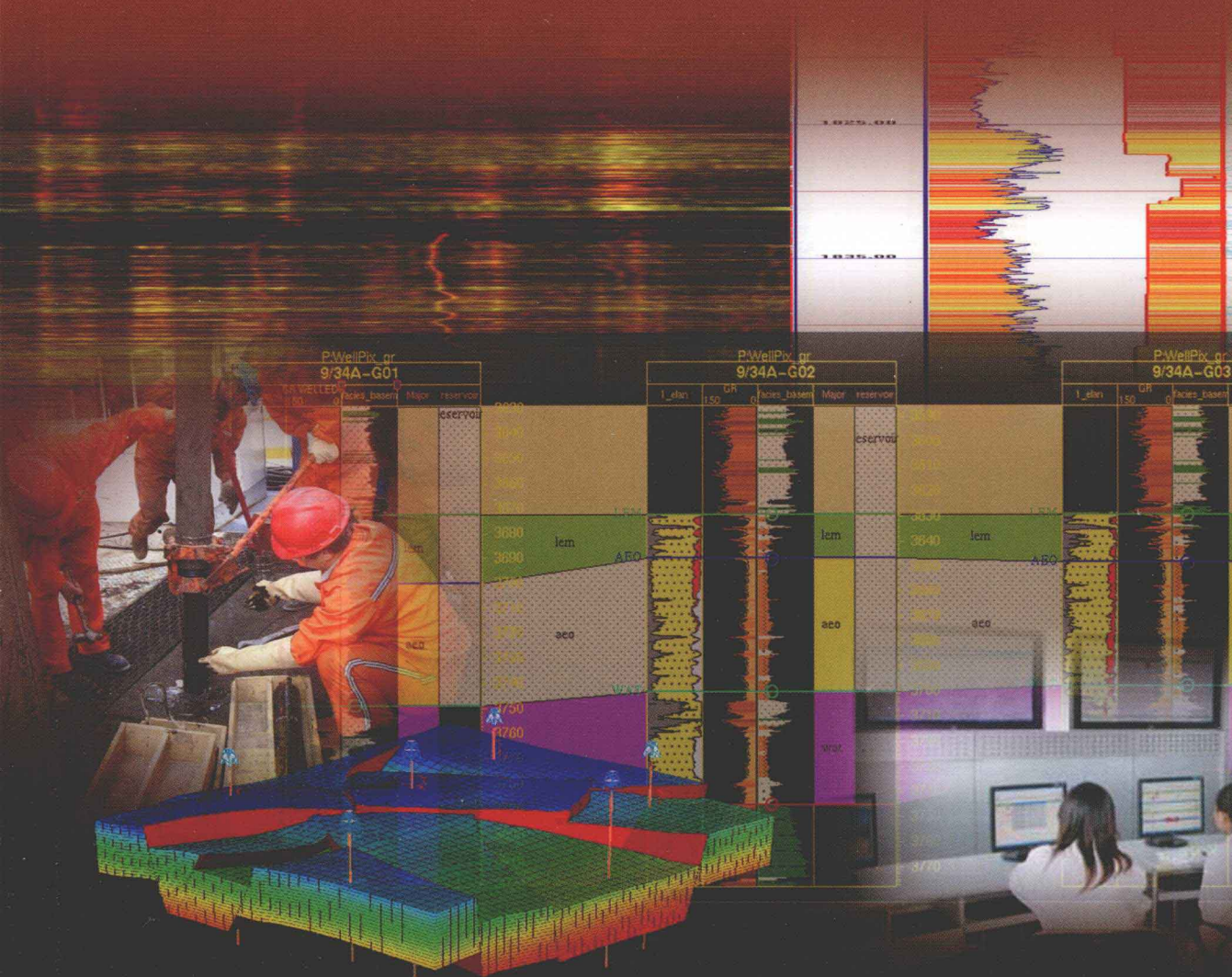


地质录井

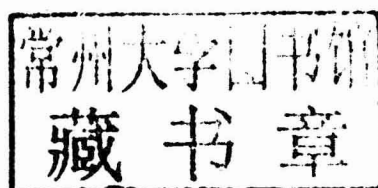
姬月凤 邢立 孟昭亮 等编著



石油工业出版社

地质录井

姬月凤 邢立 孟昭亮 等编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书从地质基础知识入手,系统介绍了现场录井过程中常规地质、定量荧光、岩石热解、工程录井等各项资料录取、解释评价方法、技术要求,钻井、测井等相关专业的基本知识,以及现场录井过程中必须掌握的安全与管理知识。为准确获取地下地质资料,保障油气显示的发现和评价提供了科学依据。

本书适合于从事录井工作人员使用,也可作为地质录井专业的本、专科学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地质录井/姬月凤等编著.

北京:石油工业出版社,2011.12

ISBN 978-7-5021-8730-9

I.地…

II.姬…

III.录井

IV. TE242.9

中国版本图书馆CIP数据核字.(2011)第204239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

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:15.75

字数:380千字

定价:65.00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

序

地质录井是钻井过程中采集和分析各种地质资料的作业。地质录井质量不仅直接影响到能否迅速标清单井地层、构造及含油气情况，而且关系到对整个地质构造的认识、含油气远景评价和油气田开发方案设计等重要问题。因此，地质录井作业在整个油气田勘探与开发过程中是一个特别重要的环节。

随着科技的进步，录井技术的发展与油气勘探开发技术的发展一样有了质的飞跃，最初它是勘探者的耳目，后来逐渐上升为勘探者的有力助手，现在已发展成为勘探者的重要参谋。这种角色的提升与技术的进步是广大录井科技工作者多年不懈努力的结果。录井已由传统的手工操作发展成为集多种仪器、多项技术手段相结合的现代录井技术，基本实现了油气勘探开发过程的全面监控，对于指导安全施工、过程监控、准确发现油气显示、评价油气水层、提高勘探开发综合效益起到不可替代的重要作用。

《地质录井》是专门针对现场录井编写的一本书籍，汇集了广大录井工作者多年的现场经验与应用成果。该书从地质基础知识入手，系统介绍了现场录井过程中岩屑录井、气测录井、工程录井、定量荧光、岩石热解等各项资料录取、解释评价方法、技术要求及钻井、测井、HSE 等知识。为准确获取地下地质资料，保障油气显示的发现和评价油、气、水层提供了科学依据，是地质录井员工学习技术、参加培训和技能鉴定较好的学习教材。希望从事地质录井专业和相关专业的技术及管理人員从中获益，不断提高业务素质和技术水平，促进录井行业的发展。

该书系统性、先进性和实用性较强，主要适用于从事现场录井工作的技术人员、生产管理人员、地质监督和录井资料解释人员，也可作为相关专业、石油院校学员学习和培训的参考教材。

借此机会，感谢多年来为录井技术发展付出辛勤劳动的录井人，愿录井技术在油气勘探开发中发挥更大作用。

中国石油勘探与生产分公司总地质师



2011 年 12 月

前 言

为适应录井技术的发展与进步，满足录井员工技术学习和培训的需求，培养高素质的录井作业和技术人员，准确地获取地下地质资料，保障油气显示的发现和评价，提高地质录井员工和施工作业队伍素质，在中国石油勘探与生产分公司精心组织下，由中国石油集团渤海钻探工程有限公司第一录井公司编写了《地质录井》一书。

该书共分四篇十七章。第一篇基础知识，介绍了石油地质学和岩石学等基本知识；第二篇现场录井，该部分是本书的核心内容，系统介绍了现场录井过程中各项资料录取与解释评价方法、技术要求等内容；第三篇相关知识，介绍了钻井和测井等相关专业的基本知识；第四篇录井 HSE 知识，介绍了现场录井过程中必须掌握的安全与管理知识。为了确保图书内容的先进性，代表行业技术水平，作者在编写过程中，参照了大量的行业技术文章和标准，由具有较高地质录井技术水平和丰富现场录井经验的专家和技术人员编写。同时，为使内容适应性、实用性和操作性更强，请国内各油田地质录井专家进行了审核，并根据专家的意见进行了修改和补充。

本书主要由姬月凤、邢立、孟昭亮等编著。姬月凤、邢立负责全书的统稿工作。

本书第一篇由姬月凤、马红、邢立、杜志强、程昌茹、李文玉、付秀清、孙淑凤编写，第二篇由孟昭亮、姬月凤、马红、王旭波、付玉香、张春林、焦香婷、马青春、葛月红、孙凤兰、刘成华、李术祥编写，第三篇由邢立、邵维志、周宝义、管震编写，第四篇由姬月凤、花盛勇、王旭波、黄国芳编写，附件部分由孟昭亮、郭琼、刘伟编写。本书由邓建华、陶青龙、沈华、任铁扣审核。

本书因涉及专业较多，加之时间仓促及水平有限，错误及不妥之处请予以批评指正。

目 录

第一篇 基础知识	1
第一章 石油地质	1
第一节 石油、天然气和油田水	1
第二节 石油与天然气的生成	6
第三节 储集层和盖层	11
第四节 油气的运移与成藏	14
第二章 地层	19
第一节 地层及地质年代	19
第二节 地层划分和对比	22
第三章 岩石学	29
第一节 岩石学的基础知识	29
第二节 现场常见岩石的特征及描述内容	39
第四章 地质构造	43
第一节 地质构造基础知识	43
第二节 褶皱和断层	46
第二篇 现场录井	55
第一章 录井前准备及钻具管理	55
第一节 录井前准备	55
第二节 钻具丈量与管理	57
第二章 现场资料收集与技术要求	61
第一节 收集开钻的基础数据	61
第二节 收集钻井过程中的油气水显示资料	62
第三节 收集地球物理测井资料	62
第四节 收集下套管及固井资料	63
第五节 收集复杂钻井情况下的录井资料	65
第六节 收集中途测试和原钻机试油资料	70
第七节 收集钻井工程及钻井液资料	72
第三章 现场录井资料采集	73
第一节 钻时录井	73
第二节 岩屑录井	76
第三节 岩心录井	89
第四节 常规荧光录井	103
第五节 井壁取心录井	105
第六节 钻井液录井	107
第七节 工程录井	111

第八节 气测录井	120
第九节 岩石热解录井	122
第十节 饱和烃气相色谱录井	123
第十一节 定量荧光录井	124
第十二节 核磁共振录井	125
第四章 录井资料解释	128
第一节 资料解释的基本概念	128
第二节 录井资料解释的基本原则	128
第三节 录井资料综合解释的步骤	130
第四节 录井油气层解释方法	132
第五章 地质录井资料整理、验收与归档	159
第一节 地质录井资料整理	159
第二节 录井资料验收与归档	169
第三篇 相关知识	172
第一章 钻井知识	172
第一节 钻井基本知识	172
第二节 钻井对钻井液性能的基本要求	175
第二章 测井知识	177
第一节 测井概述	177
第二节 电法测井	180
第三节 声波测井	183
第四节 核测井	184
第五节 测井资料的综合解释及应用	187
第三章 地震勘探知识	193
第一节 地震勘探基本知识	193
第二节 地震资料的构造解释	195
第四篇 录井 HSE 知识	201
第一章 录井作业 HSE 应急管理	201
第一节 录井作业 HSE 应急管理组织机构及职责	201
第二节 录井过程 HSE 应急处置	203
第三节 录井作业应急管理要求	207
第二章 录井作业风险识别	208
第一节 录井作业自身风险	208
第二节 相关方作业带来的风险	212
第三节 环境的影响带来的风险	214
第三章 录井作业危险化学品管理	216
第一节 录井作业危险化学品的防护	216
第二节 录井作业危险化学品的管理	220
第四章 录井作业安全用电与消防管理	223
第一节 录井作业安全用电知识	223

第二节 录井作业消防安全知识	224
第五章 录井作业 HSE 要求	228
第一节 培训持证及两书一表	228
第二节 健康管理	228
第三节 安全与环境管理	229
第四节 其他安全措施	230
附录	232
参考文献	239

第一篇 基础知识

第一章 石油地质

第一节 石油、天然气和油田水

一、石油

1. 石油的概念及组成

石油是以液态形式存在于地下岩石孔隙中的可燃有机矿产。在地下油气藏中的石油无论在成分上和相态上都是极其复杂的混合物。在成分上以烃类为主，含有数量不等的非烃化合物及多种微量元素；在相态上以液态为主，溶有大量的烃类气体及少量非烃气体，并溶有数量不等的烃类和非烃类的固态物质。

1) 石油的元素组成

石油没有确定的化学成分，也没有确定的元素组成，但它的元素组成局限在一定范围之内。据统计，石油的平均元素组成为：碳 84.5%、氢 13.0%、硫 1.5%、氮 0.5%、氧 0.5%。

碳、氢两元素在石油中占绝对优势，含量一般在 95% ~ 99%，平均为 97.5%。碳、氢两元素质量比 (C/H) 的平均值约为 6.5，原子质量比约为 0.57 (或 1 : 1.08)。碳、氢两元素主要呈烃类化合物存在，是石油组成的主体。

硫、氮、氧元素组成的化合物大多数富集在渣油或胶质、沥青质中。

2) 石油的馏分

石油的馏分是利用组成石油的化合物具有不同沸点的特性，加热蒸馏，将石油分离成不同沸点范围的若干部分，每一部分就是一个馏分。它常包括石油气、汽油、煤油、柴油、重瓦斯油、润滑油和油渣等。

3) 石油的化合物组成

石油化合物的不同组分，对有机溶剂和吸附剂具有选择性溶解和吸附的性能。根据这一特性，可以选用不同有机溶剂和吸附剂，将石油分成若干部分，每一部分就是一个组分。

石油化合物的组成主要可分为：正构烷烃、异构烷烃、环烷烃、芳烃和环烷芳烃，以及含氮、硫、氧化合物和有机金属化合物。

石油的不同馏分其化合物组成也不相同。一般来说，低沸点的轻馏分主要是由低碳数、相对分子质量较小的烷烃和环烷烃组成；中馏分以中等相对分子质量和较高碳数的烷烃和环烷烃为主，并含有一定数量的芳烃和环烷芳烃及少量的含氮、硫、氧化合物；而重馏分则由高碳数和大相对分子质量的芳烃、环烷烃、环烷芳烃和含氮、硫、氧化合物组成。

2. 石油的主要物理性质

由于石油化学成分比较复杂，而且各组成成分的含量变化较大，因而，石油没有固定

的物理常数。不同油田、不同层位、甚至同一层位不同构造部位的石油，其物理性质都可能明显的区别。

1) 颜色

石油的颜色变化较大，从无色、淡黄色、黄褐色、淡红色、深褐色、黑绿色到黑色，但大多为深色。如我国四川黄瓜山和华北大港油田，有的油井产出近于白色的石油，克拉玛依石油呈褐至黑色，玉门、大庆、胜利油田的石油均为黑色。石油颜色的深浅主要取决于胶质和沥青质的含量。胶质和沥青质含量越高，则颜色也越深，油质含量高，颜色浅。

2) 相对密度

在我国，液态石油的相对密度是指1个大气压下，20℃石油与4℃纯水单位体积的质量之比。石油的相对密度一般介于0.75～0.98之间。通常把相对密度不小于0.92的称为重质石油，相对密度为0.87～0.92的为中质石油，相对密度小于0.87的称为轻质石油。不同国家和地区划分油质轻重的标准不统一。

石油相对密度大小与所含组分、油溶气量、压力、温度等因素有关。胶质和沥青质含量高，石油的相对密度大，颜色深；油质含量高，石油的相对密度小，颜色浅。石油中溶解气量多则相对密度小，反之，则大。在其他条件不变时，相对密度随温度增加而减小，随压力增加而增大。石油中相对密度很少超过1，这是石油能自喷的一个重要原因。

3) 黏度

黏度值代表石油流动时分子之间相对运动所引起的内摩擦力的大小。黏度大则流动性差，反之则流动性好。

黏度大小主要取决于石油的组成。相对分子质量小的烷烃、环烷烃含量高，黏度就低；而相对分子质量大的石蜡、胶质、沥青质含量高，黏度就高。黏度随温度升高、溶解气量增加而降低。

4) 荧光性

石油在紫外光照射下会发光，这种冷发光的特性称为石油的荧光性。

石油的发光现象取决于其化学结构。石油中多环芳香烃和非烃具有荧光性，这是因为它们能吸收紫外光中波长较短、能量较高的光子，随后放出波长较长而能量较低的可见光即荧光。饱和烃则不发荧光。

不同石油因其组分和含量不同，荧光的颜色及强弱也不同。轻质油的荧光为浅蓝色、淡黄色，含胶质多的石油呈绿色和黄色，含沥青质多的石油或沥青质则为褐色荧光。而发光强度则与石油或沥青的浓度有关。

由于石油的发光现象非常灵敏，只要溶剂中含有十万分之一的石油或沥青物质，紫外线照射即可发光。因此，在油气勘探开发中，常用荧光分析来鉴定岩样中是否含油。

5) 凝固点

将液体石油冷却到失去流动性时的温度称为凝固点。石油凝固点的高低取决于含蜡量及烷烃碳数高低。含蜡量高，则凝固点高。

石油中的蜡是由长碳链的正构烷烃和异构烷烃组成。在地层条件下，蜡质在石油中呈溶解状态；在采油过程中，石油从油层沿油管向地面流动，压力、温度逐渐降低，到一定程度后，蜡就从石油中离析出来，结晶并聚积、黏结在油管壁上，这就是油井的结蜡现象。

凝固点低的石油为优质石油，凝固点高的石油容易使井底结蜡，给采油工作带来麻烦。在开采和集输过程中要研究其凝固点，采取升温办法解决结蜡现象。

6) 导电性

石油及其产品具有极高的电阻率。石油的电阻率为 $10^9 \sim 10^{16} \Omega \cdot m$ ，与高矿化度的油田水（电阻率为 $0.02 \sim 0.1 \Omega \cdot m$ ）和沉积岩（ $1 \sim 10^4 \Omega \cdot m$ ）相比，可视为无限大，是非导体。

7) 溶解性

石油易溶于有机溶剂而难溶于水。石油在水中的溶解度取决于其成分和外界条件。在温度和压力升高时，石油在水中的溶解度会增大。烃类在水中的溶解度（甲烷除外）随分子量增大而减小。碳数相同的烃类溶解度比较：烷烃 < 环烷烃 < 芳香烃。利用石油在有机溶剂中的溶解性，可鉴定岩石中石油的含量及性质。

二、天然气

1. 天然气的概念及类型

天然气从广义上理解，是指天然存在于自然界的一切气体。在石油及天然气中研究的主要是岩石圈中以烃类为主的天然气，即狭义天然气。

沉积圈中的天然气，根据存在相态可分为：游离气、溶解气、吸附气和固态气水化合物；根据分布特征可分为：聚集型和分散型。

游离气是一切气藏中天然气存在的基本形式。游离气聚集达到一定规模后，才能开发和有效利用。聚集型天然气可以是气顶气、气藏气和凝析气。

气顶气是指与油共存于油气藏中呈游离气顶产出的天然气。

气藏气是指单一天然气聚集中的气体。

凝析气是一种特殊的气藏气，是在较高的温度、压力下由液态烃逆蒸发而形成。采出后因压力、温度降低逆凝结而成轻质油，即凝析油。

2. 天然气的化学组成

气藏中的天然气成分以甲烷为主，非烃类气常见的有氮气、二氧化碳、硫化氢及微量的惰性气体。烃含量高于 80% 的气藏占世界上已知气藏总数的 85% 以上，90% 以上的储量集中于烃含量在 90% 以上的气藏中。以氮气为主的气藏仅占气藏总数的百分之几，以二氧化碳或硫化氢气为主的气藏占气藏总数的 1% 以下。

3. 天然气的主要物理性质

天然气一般无色，可有汽油味或硫化氢味，可燃。由于其化学组成变化大，致使物理性质也变化甚大。

1) 相对密度

天然气相对密度是指在标准状况下，单位体积天然气与同体积空气的质量比值，为无量纲。它与相对分子质量成正比，因此湿气相对密度大于干气。其数值一般随重烃、二氧化碳气、硫化氢、氮气含量的增加而增大。大多数天然气的相对密度在 $0.6 \sim 0.7$ 之间，个别大于 1。

2) 临界温度和临界压力

单组分气体都有一特定温度，高于此温度时不管加多大压力都不能使该气体转化为液体，该特定温度称为临界温度。在临界温度时使气体液化所需的最低压力称为临界压力。

天然气的临界温度随分子中碳原子数增大而提高，而临界压力则减小（甲烷除外）。

3) 溶解度

天然气能不同程度地溶解于水和石油。在一定条件下,气体在单位体积石油或水中的溶解量称为溶解度,单位为 m^3/m^3 。在相同条件下,天然气在石油中的溶解度远大于在水中的溶解度。当天然气重烃增多,或石油轻馏分较多,均可增加天然气在石油中的溶解度。降低温度或增大压力,也可增加天然气在油中的溶解度。天然气在水中的溶解度随矿化度增大而减小。

三、油田水

1. 油田水的概念及来源

1) 油田水的概念

所谓油田水,从广义上讲,是指油气田区域内的地下水,包括油层水和非油层水。狭义的油田水是指油田范围内直接与油层连通的地下水,即油层水。

2) 油田水的来源

油田水来源于盆地的沉积水、大气的渗入水、黏土矿物的转化水和地球深处的深成水。即油田水可以看作是由这几种水以不同的比例相混合,经过一系列复杂的物理化学作用,并与油气相伴生的油层水。

沉积水:是指沉积物堆积过程中保存在其中的水。这种水的含盐度和化学组成与古海(湖)水有密切关系。因此不同环境下形成的油层水的矿化度有着明显差别。

渗入水:是指大气降雨时渗入地下渗透性岩层中的水。其矿化度低,可淡化高矿化度地下水。

深成水:是指来源于上地幔及地壳深部、由岩浆游离出来的初生水(即原生水)和变质作用过程中产生的变质水,是一种高温高矿化度、饱和气体的地下水。

转化水:是沉积成岩和烃类形成过程中,黏土转化脱出的层间水及有机质向烃类转化时分解出的水。造成这种转化的主要因素是温度和压力,并伴随着离子交换等反应。

2. 油田水的产状分类

1) 根据水与油、气分布的关系分类

油田水的产状可根据水与油、气分布的相对位置,分为底水和边水。

(1) **底水:**是指含油(气)外边界范围以内直接与油(气)相接触,并从底部托着油、气的油层水。

(2) **边水:**是指含油(气)外边界以外的油层水,实际上是底水的外延。

在油田范围内非油层水,可根据它们与油层的相对位置,分别称为上层水、夹层水和下层水。

2) 根据水在岩石中的存在状态分类

油田水存在于储集层的孔隙—裂缝中,按照水在其中的存在状态,可分为气态水、吸附水、毛细管水和自由水4种。

(1) **气态水:**充满在未被水饱和的岩石孔隙中,通过蒸发和凝结作用,与液态水相互转化。气态水由水蒸气压力大的地方向水蒸气压力小的地方转移,对岩石中水的分配有一定的影响。

(2) **吸附水:**吸附在岩石颗粒表面,呈薄膜状。这部分水即使在高温、高压下也不能自由移动。

(3) 毛细管水：是存在于毛细管孔隙—裂缝中的水，当作用于水的外力超过毛细管力时，水才能运动。一般来讲，微毛细管中的水在地层压力条件下是不能流动的。

(4) 自由水：也叫重力水，是存在于超毛细管孔、洞和缝隙中的水，在重力作用下能自由移动。

3. 油田水的矿化度

水的总矿化度，即水中各种离子、分子和化合物的总含量，以水加热至 105°C ，蒸发后所剩残渣质量或离子总量来表示，单位为 mg/L 、 g/L 。

油田水一般具有较高的矿化度，这是由于油田水埋藏地下深处，长期处于停滞状态，缺乏循环交替所致。一般海相油田水矿化度比陆相高，多数海相油田水总矿化度在 $(5 \sim 6) \times 10^4 \text{mg/L}$ 以上，陆相油田水的矿化度一般为 $(0.5 \sim 3) \times 10^4 \text{mg/L}$ 。

4. 油田水的物理性质

1) 颜色及透明度

油田水通常带色且混浊不清，含 H_2S 时是淡青色，含铁质胶状体时呈淡红色、褐色或淡黄色。

2) 密度及黏度

因油田水含盐类较多，使密度及黏度均比纯水高。油田水密度一般大于 1g/cm^3 ，含盐量越高，则密度及黏度越大。温度对黏度影响较大，随温度升高，黏度则降低。

3) 嗅觉及味觉

油田水溶有 NaCl 、 MgSO_4 等多种盐类， NaCl 具咸味； MgSO_4 具苦味。油田水中含少量石油时，往往具有汽油或煤油味；含 H_2S 时，具腐蛋味。总之，油田水给人的嗅觉及味觉是比较特殊的。

4) 温度

油田水的温度随着油层的埋深增加而增加。据测定，油田水的温度一般介于 $20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间。

5) 导电性

水为极性化合物，纯水不是良导体，而油田水中因含有各种离子，所以具有导电性。离子浓度越大，导电性越强；温度增高，导电性增强。

5. 油田水的类型

在石油地质研究过程中，为了进一步了解油田水的特征，要根据水中所含离子的比例及各种典型的盐类对油田水进行分类，目前应用较多的有帕勒梅尔分类和苏林分类两种。在这两种分类方案中，以苏林分类较为简明，现简介如下。

苏林分类属成因分类，即不同的水型反映不同的地质环境。根据大陆水和海水的化学成分特性（大陆水 $\text{Na}^+ > \text{Cl}^-$ ；海洋水 $\text{Na}^+ < \text{Cl}^-$ ），把天然水中的 Na^+ 和 Cl^- 当量比例作为分类基础，从而判断水的生成环境是属于大陆的还是海洋的。

1) Na_2SO_4 水型

由于地壳中钠的含量远远超过氯，在岩石被水溶滤过程中，相当量的钠和氯被除去，造成钠的过剩，过剩的钠离子和足够量的硫酸根离子化合而出现硫酸钠型水，表示地壳的水文地质封闭性差，同地表水、大气降水交替频繁，得以不断补充硫的氧化物，从而使水中的 SO_4^{2-} 增加。

因此，此水型代表大陆环境，是环境封闭性差的反映，一般分布于地表或者地下浅层

水活跃区，不利于油气藏的保存，其分布带一般无油气藏。当然，个别油田也有 Na_2SO_4 型水，但此时正是油气藏濒于破坏的阶段。

2) NaHCO_3 水型

一般根据矿化度分为高矿化度的和低矿化度的两种。高矿化度 NaHCO_3 型水代表封闭还原的环境，环境缺乏 SO_4^{2-} 的补充，使 Na^+ 得以和 HCO_3^- 结合，形成典型组分 NaHCO_3 。所以，高矿化度 NaHCO_3 型水为油田水的基本水型之一，我国许多湖泊碎屑岩含油层中的油田水属 NaHCO_3 水型。

3) MgCl_2 水型

此水型的典型代表是海水，地下水中有 MgCl_2 水型，可能是地表水渗入地下海相沉积岩中，溶解了其中的盐分而形成的；或为来自深层的 CaCl_2 型水与上部的 NaHCO_3 型或 Na_2SO_4 型低矿化度水掺和产生的。 MgCl_2 型水环境下一般没有或少有油气田。

4) CaCl_2 水型

其成因有多种解释，一般认为是由于阳离子交替吸附作用的结果。即在封闭的环境中，水的浓度逐渐加大， NaCl 富集，水中的钠离子可把岩层中的钙、镁离子等当量地替换出来，由于岩层中呈吸附状态的钙多于镁，因而在阳离子交替作用的后期，水中必然出现 CaCl_2 。

所以， CaCl_2 水型代表水所处的环境封闭性好，有利于油气聚集和保存。该水型在油气田区广泛分布，我国大部分油田均有发现。

第二节 石油与天然气的生成

油气生成是石油地质学的三大核心问题之一，是研究油气藏形成及分布的基础。

一、油气生成的物质基础

1. 油气生成的原始物质

根据油气有机成因理论，生物体是生成油气的最初来源。这些生物主要是细菌、浮游植物、浮游动物和高等植物等，生物死亡以后的残体经沉积作用埋藏于水下的沉积物中成为沉积有机质，经过一系列的生物化学、物理化学变化逐渐形成石油和天然气。

2. 干酪根

沉积有机质并非是生油的直接母质。生物死亡之后，与沉积物一起沉积下来，构成了沉积物的分散有机质。这些有机质经历了复杂的生物化学及化学变化，通过腐泥化及腐殖化过程才形成一种结构非常复杂的生油母质——干酪根，成为生成油气的直接先驱。

1) 概述

干酪根 (Kerogen) 一词源于古希腊，意指能生成油或蜡状物的物质，后来被引用泛指沉积岩中的不溶有机质。1979 年，Hunt 将干酪根定义为：沉积岩中所有不溶于非氧化性的酸、碱和非极性有机溶剂（如氯仿、苯、甲醇）的分散有机质。这一概念已逐渐被石油地质界和地球化学界所接受。与其相对应，岩石中可溶于有机溶剂的部分，称为沥青 (Bitumen)。

2) 干酪根的类型

由于在不同的沉积环境中，有机质的来源不同，形成的干酪根类型也不同，其性质和

生油气潜能有很大差别。

(1) I 型干酪根 (也称腐泥型)。原始氢含量高, 氧含量低, H/C 原子比介于 $1.25 \sim 1.75$, O/C 原子比介于 $0.026 \sim 0.12$ 。直链烷烃含量多, 多环芳烃及含氧官能团很少。

I 型干酪根一般为细纹层状或无定形粉末状, 颜色为发暗的深色。其原始母质为低等植物和浮游动物, 特别是藻类、细菌的类脂化合物和聚合类脂化合物 (油脂、脂肪酸、胶质、香脂、烃类等) 组分, 生油潜能高。

(2) II 型干酪根 (也称过渡型)。这是一类最为常见的干酪根, 其原始氢含量较高, 但稍低于 I 型, H/C 介于 $0.65 \sim 1.25$, O/C 介于 $0.04 \sim 0.13$, 属高度饱和的多环碳骨架, 含中等长度直链烷烃和环烷烃甚多, 也含多环芳香烃及杂原子官能团。

II 型干酪根的原始母质来源多样, 既有低等生物, 也可有高等植物。热解时 II 型干酪根比 I 型干酪根产生的烃类要少, 生油潜能中等。例如, 法国巴黎盆地侏罗系下托尔统页岩经热解后, 产物约为有机质原始质量的 60%。北非志留系、中东白垩系、西加拿大泥盆系, 以及我国东营凹陷古近系沙三段的干酪根均属此类。

(3) III 型干酪根 (也称腐殖型)。原始氢含量低, 氧含量高, H/C 介于 $0.46 \sim 0.93$, O/C 介于 $0.05 \sim 0.30$, 以含多环芳香烃及含氧官能团为主, 饱和烃链很少, 被连接在多环网络结构上。

III 型干酪根主要来源于陆地高等植物有机质, 含有许多可鉴别的植物碎屑。镜质组是其主要的显微组分, 这与煤的特征相似, 所以在组成随埋深演化方面, III 型干酪根常可与煤相比。III 型干酪根与 I 型、II 型相比热解产物很少, 热解时可给出 30% 产物, 生油能力差, 但在高成熟阶段可形成数量可观的甲烷气体。喀麦隆杜阿拉盆地上白垩统及我国鄂尔多斯盆地侏罗统延安组的干酪根即属此类。

二、油气生成的外部条件

沉积有机质是油气生成的物质基础, 要生成大量的石油和天然气, 就必须有足够的沉积有机质, 这就要求必须要有适于生物大量生长和繁殖、堆积和保存的沉积环境。此外, 还要有利于有机质大量向油气转化的地质条件。

1. 地质环境

1) 古地理环境

国内外油气勘探实践证明, 浅海、三角洲和深水一半深水湖泊环境最有利于烃源岩的形成。

在海相环境中, 滨海区海进、海退频繁, 浪潮作用强烈, 不利于生物繁殖和有机质的堆积与保存。深海区生物本来就少, 生物死亡后下沉至海底需经历巨厚水体, 易遭氧化破坏, 加上离岸又远, 陆源有机质需经长途搬运, 易被淘汰氧化, 不利于有机质的堆积和保存。而在大陆架内, 水深不超过 200m, 水体较宁静, 阳光、温度适宜, 生物繁盛, 尤其各种浮游生物异常发育, 死亡后不需经过太厚的水体即可堆积下来。

在三角洲地区, 陆源有机质源源不断地搬运而来, 加上原地繁殖的海相生物, 致使沉积物中的有机质含量特别高, 是极为有利的生油区域; 至于海湾及潟湖, 属于半闭塞无底流的环境, 也对有机质的保存有利。

大陆环境的深水一半深水湖泊是陆相烃源岩发育区域。一方面湖泊能够汇聚周围河流带来的大量陆源有机质, 增加了湖泊营养和有机质数量; 另一方面, 湖泊有一定深度的稳

定水体，可以提供水生生物繁殖发育所需要的条件。特别是近海地带的深水湖盆，更是有利的生油拗陷，因为那儿地势低洼、沉降较快，能长期保持深水湖泊环境和安静的还原环境。这种地区气候温暖湿润，浮游生物及藻类繁盛，而且往往又是河流三角洲的发育地带，河水带来大量陆源有机质注入近海湖盆，有机质异常丰富。

浅水湖泊和沼泽地区，水体动荡，氧气易于进入水体，不利于有机质的保存。这里的生物以高等植物为主，生油潜能差，多适于造煤和生成煤型气、沼气，为天然气的来源。

2) 古气候条件

古气候条件也直接影响生物的发育。年平均温度高、日照时间长、空气湿度大，都能显著增加生物的繁殖能力。所以，温暖潮湿的气候有利于生物的繁殖和发育，是油气生成的有利外界条件之一。

3) 还原环境

有机质的保存和向石油的转化需要有还原环境，长期的还原环境才能使丰富的有机质免遭氧化分解，得以顺利堆积、保存并向油气转化。

4) 大地构造条件

板块构造学说认为地球表层是由若干个岩石圈板块拼合而成的。这些岩石圈板块的水平运动中包含着垂直构造运动的性质，因而在地质历史上能够形成各种类型的沉积盆地，为油气生成、运移、聚集提供了有利场所。

此外，在大型沉积盆地内，由于断裂分割或沉降速度的差异，造成盆地起伏不平，出现许多次级凸起与凹陷，使有机质不必经过长距离搬运便可就近沉积下来，避免途中氧化。所以，沉积盆地的分割性对有机质的堆积与保存都有利。

大地构造条件是最根本的因素，它控制着古地理、古气候和地球化学环境特征。所以，我们在研究任何区域油气生成条件时，必须从区域大地构造特征入手。

2. 物化条件

适宜的地质环境为有机质的大量繁殖、堆积和保存创造了有利条件，但有机质向石油和天然气的演化，是诸多环境因素综合作用的结果。近年来，世界各国的油气勘探实践和理论研究表明，温度和时间是影响油气生成的一对主要因素，另外还有细菌、催化剂、放射性和压力等影响因素。

1) 温度与时间

地球可以看做是一个巨大的地热场，在地质环境里，无论油气的生成、运移、聚集或破坏，都不可避免地要受到地温的控制与影响。在沉积有机质向油气转化的过程中，同任何化学反应一样，温度是最有效和最持久的作用因素，而时间的作用主要体现在转化物量的积累上。

所以，在有机质向石油转化的过程中，温度不足可以由延长反应时间来补偿。但若沉积物埋藏太浅，地温太低，有机质热解生成烃类所需反应时间很长，实际上也难以生成具商业价值的石油。随着沉积有机质埋藏深度的增大，当温度升高到一定数值时，有机质便开始大量转化为石油，这个温度界线称为有机质的“成熟温度”或“门限温度”，成熟温度所在的深度，称为“成熟点”或“门限深度”。沉积有机质进入门限温度（深度）意味着开始进入“主要生油期”，主要生油期所对应的剖面深度区间称为“液态窗”。

2) 微生物的影响

微生物是一种身体构造简单、形体小的生物，主要存在于成岩作用阶段。微生物，特

别是细菌在自然界有很强的生存适应能力，是地球上分布最广、繁殖最快的一种生物，按其生活习性可分为喜氧细菌、厌氧细菌和通性细菌3类。由于油气的生成需在一个还原环境中才能完成，因此厌氧细菌对油气生成最有意义。细菌对油气生成演化的意义包括：在还原条件下，有机质经细菌分解生成甲烷、氢、 CO_2 、有机酸及其他CH化合物；有机质经细菌作用可直接产生沥青物质；细菌本身也是良好的生油原料，有些细菌还会在自身细胞中合成少许固态高分子烃类。受生存条件的限制，细菌的作用主要出现在有机质改造的早期。

3) 催化作用

有机质生成石油烃类主要有两类反应，即C—C键断裂和脂肪酸脱羧。这些反应在实验室中只有在温度高于 400°C 的条件下方可实现。而在沉积物中这两类反应却可以在 150°C 以下进行，这表明在地质条件下这两类反应是在催化剂参加下完成的。

在自然界有机质向油气转化过程中，主要存在无机盐类和有机酵母两类催化剂。

黏土矿物是自然界分布最广的无机盐类催化剂。在实验室中用黏土（主要是蒙皂石）与有机质的复合物在缓慢加热时便会脱羧基、氨基形成低分子量的烷烃、环烷烃和芳香烃。黏土矿物的催化能力同其吸附性质有关。催化剂表面吸附两种或两种以上物质的原子时，它们便会相互作用而形成新的化合物。烃源岩中大量存在的黏土矿物蒙皂石就是很好的催化剂，伊利石次之。

有机酵母催化剂能加速有机质的分解。当有酵母存在时，有机质的分解比在细菌活动时还要快很多。在富含有机质的岩石中，特别是在富含植物残余的岩石中，酵母的活动性最大。酵母的分布很广，特别是发酵作用几乎不需外部能量来源，可以不受压力、温度、湿度及食物补给的影响。因此，酵母在油气生成过程中的作用可能是很重要的。

4) 放射性作用

在黏土岩、碳酸盐岩中富集有大量的放射性物质，主要放射性元素有铀、钍和钾。放射性物质产生的高能粒子可以导致水分解而产生大量的游离氢，同时放射性衰变产生的能量，还可以成为有机质转化的能量来源之一。游离氢和能量的提供将同时增加油气形成的产率和速度，对于油气的生成非常有利。

5) 压力影响

沉积物埋藏的深度随着地壳的下降而不断加深，上覆地层厚度不断增加，温度、压力也将随之升高。实验室模拟试验证明，在中等温度（ 50°C ），增加压力达 $(300 \sim 700) \times 10^5\text{Pa}$ ，可以使类脂化合物产生烃类。适当的压力可以促使加氢作用，使高分子烃变成低分子烃，使不饱和烃变成饱和烃。

但是，由于生油门限温度不是很高，可以认为油气生成时不需要高压。干酪根的生烃反应，尤其是较高温度下生成气态烃的反应，显然是体积增加的反应，高压将阻碍或降低油气生成的过程。同时，按照现代油气生成理论，生成的油气必然要从有机网络层中排替出来，经过裂隙再进入储集层中。油气从有机质网络层中的排替主要是由内部压力作用引起的，如果外部有相对较高的流体压力或地层压力，这种过程就会受到抑制。

所以，目前普遍认为，异常高压的存在会抑制烃源岩的热演化，阻碍有机质的成烃作用和烃源岩的排烃作用，延缓油气的生成过程，使油气生成速率降低，液态窗的下限下移。

在有机质的成油转化过程中，上述各种条件和作用可能都是很重要的，但在不同阶段，