

面向 21 世纪 课程教材  
**Textbook Series for 21st Century**

# 油藏地质学

伍友佳 蔡正旗 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书共分9章,内容包括油气生成与运移聚集的石油地质知识、油气藏描述知识,以及油藏在开发过程中的地质变化等开发地质知识。

本书适用于石油工程、石油物探、石油测井等专业人员使用,也可作为从事油田化学、油田经营管理等专业人员学习掌握油藏地质知识的教材或参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

油藏地质学/伍友佳,蔡正旗主编.

北京:石油工业出版社,2000.12

面向21世纪课程教材

ISBN 7-5021-3221-X

. 油...

. 伍... 蔡...

. 天油天然气地质-高等学校-教材

. P618.130.2

中国

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云红光印刷厂排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×960毫米 16开本 18.5印张 340千字 印1—2000  
2000年12月北京第1版 2000年12月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3221-X/TE·2441

定价: 30.00元

# 前 言

《油藏地质学》是为非地质专业的本科学生学习油气地质知识而开设的一门课程。在学习了《地质学基础》课程之后，为使学生了解掌握油气藏形成、油气藏描述、油藏地质在开发过程中的变化等油气地质知识，特意编写了这本《油藏地质学》教材。本书内容包括油气生成与运移聚集的石油地质知识、油气藏描述知识，以及油藏在开发过程中的地质变化等开发地质知识。目的在于让从事石油上游行业工作的非地质勘探人员通过本书的学习就可基本了解掌握油藏或油田地质的基本知识。这就为从事钻井、采油、油藏工程、石油物探及其他石油上游行业工作的同志学习后续专业课程打下一个全面的油藏地质知识的基础。

本书绪论、1~3章及8~9章由伍友佳高级地质师编写，4~7章由蔡正旗副教授编写，全书由伍友佳统稿。由于水平所限，加之时间仓促，错讹之处在所难免，望各位专家、同行及广大读者给予指正。

编 者

2000年11月

# 目 录

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 绪论.....                  | (1)   |
| 第一章 石油的生成.....           | (5)   |
| 第一节 石油组成及性质.....         | (5)   |
| 第二节 石油的生成 .....          | (16)  |
| 第三节 生油岩与生油层 .....        | (25)  |
| 第四节 天然气的成因类型 .....       | (28)  |
| 第二章 油气储集层 .....          | (32)  |
| 第一节 储集层基本特征 .....        | (32)  |
| 第二节 碎屑岩储集层 .....         | (37)  |
| 第三节 碳酸盐岩储集层 .....        | (47)  |
| 第四节 其他岩类储集层 .....        | (56)  |
| 第五节 盖层与生储盖组合 .....       | (60)  |
| 第三章 油气藏 .....            | (65)  |
| 第一节 油气运移 .....           | (65)  |
| 第二节 圈闭与油气藏 .....         | (69)  |
| 第三节 油气藏形成的基本条件 .....     | (74)  |
| 第四节 油气藏分类及油气勘探简介 .....   | (78)  |
| 第四章 油藏描述的地质资料 .....      | (84)  |
| 第一节 地质录井资料 .....         | (86)  |
| 第二节 测井资料 .....           | (90)  |
| 第三节 开发地震资料 .....         | (95)  |
| 第四节 测试资料 .....           | (96)  |
| 第五章 储集层研究与描述 .....       | (98)  |
| 第一节 油层对比.....            | (100) |
| 第二节 沉积微相研究.....          | (114) |
| 第三节 储集层空间展布及连通性研究.....   | (125) |
| 第四节 储集层非均质性研究.....       | (130) |
| 第五节 储集层地质模型与储集层综合评价..... | (150) |
| 第六章 油藏特征研究.....          | (161) |
| 第一节 油藏构造特征研究.....        | (161) |

|      |                       |       |
|------|-----------------------|-------|
| 第二节  | 油藏流体及油藏周界研究.....      | (191) |
| 第三节  | 油层压力和温度.....          | (196) |
| 第七章  | 油气储量计算.....           | (213) |
| 第一节  | 油气储量概念及分类.....        | (213) |
| 第二节  | 容积法计算油气储量.....        | (216) |
| 第三节  | 油气可采储量计算.....         | (229) |
| 第四节  | 油气储量评价.....           | (232) |
| 第八章  | 油藏开发期地质特征.....        | (236) |
| 第一节  | 油藏开发过程、开发阶段及开发分类..... | (236) |
| 第二节  | 油层水洗规律.....           | (253) |
| 第三节  | 开发过程中的油藏地质变化.....     | (258) |
| 第九章  | 剩余油分布研究.....          | (272) |
| 第一节  | 剩余油概念及类型.....         | (272) |
| 第二节  | 剩余油分布研究.....          | (275) |
| 参考文献 | .....                 | (286) |

# 绪 论

## 一、油藏地质学课程设置与定名

### 1. 油藏地质学课程的设置

“油藏地质学”一词，对许多人来说，虽然不难理解，但却是较为陌生的。因为迄今为止，在中外石油高校中，尚未设置“油藏地质学”这一课程或见到这一课程的专用教材。之所以开设这门课程，主要是因为有以下两点：

#### (1) 石油高校系科改革与专业合并的需要

自1995年以来，国内各石油高校已全部将钻井工程、采油工程、油藏工程三个专业归并为石油工程专业，将物探、测井专业合并为石油地球物理探测专业等。随着专业的合并，专业知识面势必扩宽，专业课程数目将会增多。显然，对一些课程进行适当调整合并，既必要，又必须。

#### (2) 专业地质课程系统性的需要

非石油地质专业的师生常感到地质课程分散，缺乏系统性、连贯性，遂有集地质课程于一门课程的建议。传统的石油地质专业知识分布在《普通地质学》、《矿物学》、《普通岩石学》、《沉积岩石学》、《地层古生物学》、《构造地质学》、《石油地质学》、《油矿地质学》、《开发地质学》等课程中，这对于非石油地质专业的师生来说确有分散之嫌。在考虑上述意见并全面权衡以后，各方比较一致的意见是，将石油工程专业、石油地球物理探测专业的地质课程集中归并为两门：一门是《地质基础》，集中讲述普地、岩矿、沉积岩与沉积相、构造等地质基础知识；另一门是《油藏地质学》，集中介绍油藏形成、油藏描述、油藏开发地质等专业地质知识。这样的课程设置，便于非地质专业学生能对石油地质的专业知识形成一个系统连贯的认识。

### 2. 油藏地质学课程的定名

本课程所以定名为《油藏地质学》，是考虑到以下两项原因：

1) 非地质勘探人员的石油业务工作主要集中在油藏和较油藏略作扩展的油田，他们一般不需要从整个盆地或整个油区来思考地质问题。“油藏地质”或“油藏地质学”一词，已较为准确地概括了他们的专业地质知识范围。

2) 有同志建议定名为“开发地质学”，以突出其适应石油工程及相关开发专业的特点。但考虑到《开发地质学》这门课程已于数年前在一些石油高

校的地质专业中开设，并且已有书名为《开发地质学》的教材出版，其内容则是在学习了《石油地质学》、《油矿地质学》之后的地质知识的延伸扩展，这显然与这里的“油藏地质学”所涵盖的内容大不一样。若采用“开发地质学”一名，则势必造成混乱。

基于以上原因，《油藏地质学》课程的名称就这样确定了。

### 3. 油藏地质学的定义

在了解了上述关于《油藏地质学》的设置与定名的情况以后，就可以对“油藏地质学”做如下定义：

油藏地质学就是关于油藏形成、油藏地质特征、油藏在开发中的地质变化的理论和研究方法的一门学科。

#### 二、油藏地质学研究的内容

油藏地质学主要研究以下三方面的内容。

##### 1. 石油及油藏的形成

石油与油藏都是在漫长的地质历史时期中逐渐形成的，它们的形成和演化都有其自身的规律性。这部分内容传统上是属于《石油地质学》的研究范畴，但现行的《石油地质学》教材都是以勘探找油为目的编写的，其内容大量涉及石油与油藏的形成、赋存和分布的学说、理论和研究，这对于非地质专业的学生来说显然太多、太专、太深。因此，本教材只选取其中关于石油与油藏形成的基本部分，而将主要基于勘探找油目的的油气藏类型及分布规律等内容予以大量舍弃。在资料与研究成果的使用、介绍中，尽可能补充近年来较为流行或公认的研究成果，由此形成了本教材的第1章~第3章。

##### 2. 油藏特征的认识描述

油藏深埋地下，石油渗浸在地层岩石中，人们看不见摸不着。它们像什么样？怎样探测认识它们？怎样掌握并展示它们的形态特征、油层分布状况、资源数量与质量等，这便是油藏描述的内容。《石油地质学》也讲述油藏描述的有关内容，但它仅仅局限于勘探阶段的粗线条的描述；《油矿地质学》大量讲述油藏描述的内容，但仍然兼顾勘探较多，立足开发甚少。本教材的主要服务对象既然是石油工程专业人员，当然应该立足开发来讲述油藏描述的内容。因此，根据近年油藏描述、储集层研究方面的最新成果和流行认识进行了适当的补充增删，由此形成了本教材的第4章~第7章。

##### 3. 油藏开发中的地质变化与剩余油分布

油藏投入开发以后，不仅有地下油气水的运动变化，而且还有地下油层自身及其与流体相互作用的变化，这些变化共同影响着油气的采出和油田开发效果。而开发过程中的油水运动变化和剩余油分布，则是油田开发工作者所全力追寻的目标。这部分内容传统上是由《开发地质学》讲述的。本教材

将这部分内容集中并系统化，尤其注意补充新的研究资料，注重介绍现场生产应用情况，由此形成了本教材的第 8 章和第 9 章。

### 三、油藏地质在油气田开发中的地位和作用

油藏从发现到开发结束，要经历很长的时间，其间要经过评价勘探、开发设计与实施、开发生产、开发调整及提高采收率等多个工作阶段。在油田从发现到开发结束的整个过程中，油藏地质从始到终都是整个勘探开发工作的起点和基础。离开油藏地质，油田开发则无从谈起；油藏地质情况不清，这样的油藏开发起来必然问题重重；只有油藏地质情况清楚，才谈得上科学合理开发油田。因此可以这样说，油藏地质在油气田开发中处于一种基础、核心、关键和支配的地位，油藏地质工作在油气田开发中起着智囊团或参谋部的作用。“油田开发工作者的工作岗位在地下，斗争对象是油层”，这句话深刻地揭示了油藏地质知识和油藏地质工作在油气田开发中的重要地位与作用。

油藏从勘探到开发结束的整个过程分阶段的主要地质工作见表 1。在表 1 中，只有区域勘探阶段的地质工作不属于油藏地质研究的范围。

表 1 石油勘探开发的基本过程与各阶段的主要地质工作

| 分项     | 区域勘探阶段               | 评价勘探阶段               | 开发设计与开发实施阶段                       | 开发生产阶段                  | 调整及提高采收率阶段                      |
|--------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 目的     | 找油                   | 探明油藏                 | 设计实施开发方案                          | 采出油气                    | 提高采油速度与采收率                      |
| 成果     | 提供油藏                 | 提交开发储量               | 提供油气生产能力                          | 提供商品原油                  | 改善开发效果，增加可采储量                   |
| 时间     | 1~几年                 | 1~3年                 | 1~3年                              | 20~50年                  |                                 |
| 主要地质工作 | 生储评价，成藏条件研究，指示有利勘探方向 | 钻探取资料，油藏描述，油藏评价及储量计算 | 试采及开发试验，编制开发方案，钻井，油建，编制射孔、投产、投注方案 | 动态分析，开发管理，油藏静态研究，开发治理研究 | 油藏开发的整体解剖研究，编制调整方案，提高采收率研究与方案编制 |

### 四、怎样学习油藏地质学

油藏地质学的学习，既有一般学科的共性，也有其自身的特点。要想学好一门课程，需要了解其特点，并采取有助于该课程学习的针对性措施，方能收到事半功倍的效果。建议大家从以下三个方面进行努力。

#### 1. 了解学科性质

从学科性质来说，油藏地质学具有如下两个重要的特性：

##### (1) 综合性

油藏地质学作为石油工程专业和石油物探专业学生的地质专业课，它涵

盖了该专业的全部地质知识；从横的方面来说，油藏地质学与油层物理、渗流力学、石油物探、石油测井、油藏工程与采油工程关系紧密，互为基础或相互穿插补充。要学习油藏地质学这门课程，就应该学好各门相关课程。

## (2) 应用性

油藏地质学从科学或学科这一角度来看，可能是不够系统不够完善的，但它确是油田开发的起点和基础，是油田开发极端重要必不可少的核心工作。油藏地质学的存在并不在于其理论体系的严密，而是在于生产实践的需要。因此，怎样学习和应用油藏地质学知识来解决生产实际问题，指导油田开发生产，改善开发效果，提高油气采收率，就显得特别重要。

### 2. 学好相关课程

鉴于油藏地质学较强的综合性和重要的应用性，必须努力学好这门课程。为达到此目的，必须学好相关课程，比如《地质基础》课程中的《沉积岩与沉积相》、《构造地质学》、《油层物理》、《渗流力学》、《石油测井》，及后续的《油藏工程》、《采油工程》等课程。只有学好相关各课程，才能学好油藏地质学。

### 3. 养成踏实严细的学风与作风

油藏地质学是一门直接为油气田开发及勘探服务的学科。之所以强调其学风与作风的踏实严细，理由如下：

1) 油田开发与勘探的高风险与高投入，必须要求在其中起关键作用的油藏地质工作者细致、严格、踏实。在油藏勘探开发工作中，地质工作者以踏实严细而创造或节省上亿元财富的事迹并非个别；但同样，由于地质工作的疏忽而损失或浪费上亿元的事例确也并不罕见。

2) 油田开采动态反应与开发效果表现的滞后性，使得对开采措施不当或开发决策失误的发现必然较晚，这往往会造成相当的损失和一定的后遗症。如果能通过踏实严细的工作避免一次或几次这样的失误，或者能更早地发现和纠正这些失误，这不是一个油藏地质工作者一生中值得骄傲自豪的功劳业绩吗？

3) 油藏地质工作主要是钻研资料。必须搜集油藏从第一口探井开始到至今为止所能得到的一切资料，并进行仔细的分析研究，时时刻刻不能懈怠，方能掌握油藏地下的最新情况，以便随时制定科学合理而又切实可行的对策措施。

4) 油藏地质工作在油田开发中处于参谋部、智囊团的重要地位，一项措施的实施或一个方案的施行，常常牵动千军万马，稍有不慎则徒劳无功。

学风与作风不是一个早晨一下决心就能养成的，必须在长期的学习、生活、工作中不懈地自律，并且应从青年时代开始。

# 第一章 石油的生成

石油一词，源出北宋沈括（公元 1031 ~ 1095 年）的《梦溪笔谈》：“富延境内有石油，旧说高奴县出脂水，即此也”。而在更早的唐、晋、汉，甚至周代，我国已有关于石油的记载。比如，周代的《易经》中就有“上火下泽”、“火在水上”、“泽中有火”的记载。英文中，石油一词为“petroleum”或“rockoil”。石油是天然产出的烃类物质，在正常条件下，呈气态者称为天然气，呈液态者称为石油或原油（原状的未经加工的石油），呈固态者称为沥青。

## 第一节 石油组成及性质

石油是人类现今使用的最重要的能源和宝贵的资源。现代的工业农业生产、人们的衣食住行都与石油息息相关。要了解它的生成条件及赋存状况从而加以开采利用，首先应当了解它的物质组成及物理化学性质。

### 一、石油的化学组成

石油的化学组成极为复杂。石油既不是由单一的元素组成，也不是简单的化合物组成，而是以碳、氢化合物（烃）为主的含多种金属、非金属化合物的复杂化合物的混合物。

#### 1. 石油的元素组成

组成石油的化学元素以碳、氢为主，其次为硫、氮、氧，此外尚有 30 余种微量元素。

一般石油中，碳的含量为 84% ~ 87%，氢的含量为 11% ~ 14%。碳与氢在石油中以烃的形态出现，两者的含量一般可达 97% ~ 99% 左右，成为石油组成的主要元素。硫、氮、氧的含量一般只有 1% ~ 4%。微量元素虽然多达 30 余种，但其含量极微，一般合计不到万分之几。

大多数石油含硫量低于 1%，但有些油田的石油含硫量高达 4% ~ 5%。例如中东的许多油田所产原油含硫量达 2.8% ~ 4.9%，加拿大阿尔伯达的阿瑟巴什卡重油含硫量高达 5.5%，委内瑞拉的波斯坎油田含硫量高达 5.4%。

大多数石油含氮量只有千分之几，但个别油田的原油含氮量可以很高，例如美国加利福尼亚第三系的石油含氮量高达 1.4% ~ 2.2%。

石油中氧含量一般只有千分之几，个别原油可高达 2% ~ 3%。

石油中的微量元素，以金属元素为主，其含量很低，一般低于万分之几，但种类极多。目前发现的微量元素有（按含量多少及常见程度排列，加括号的元素为非普遍含有）：

Fe, Ca, Mg, (Si), Al, V, Ni, Cu, Sb, Mn, Sr,  
Ba, B, Co, Zn, Mo, Pb, Sn, (Na), K, P, Li,  
Cl, Bi, Be, Ge, Ag, As, Gd, Au, Ti, Cr, Cd

这些微量元素主要存在于炼油剩下的残渣油中，与硫、氮一起常与沥青类分子键合，燃烧后成为主要的灰分物质，故又称为灰分元素。上述微量元素中的 V 与 Ni 由于具有生油指相意义并且普遍分布，因而受到广泛的关注。

一些油田石油的元素组成见表 1-1。

表 1-1 国内外一些油田原油的元素组成

| 油 田       | C, %  | H, %  | S, % | N, % | O, % |
|-----------|-------|-------|------|------|------|
| 大 庆       | 85.74 | 13.31 | 0.11 | 0.15 | —    |
| 胜 利       | 86.26 | 12.20 | 0.80 | 0.41 | —    |
| 大 港       | 85.07 | 13.40 | 0.12 | 0.23 | —    |
| 孤 岛       | 84.24 | 11.74 | 2.20 | 0.47 | —    |
| 克拉玛依      | 86.10 | 13.30 | 0.05 | 0.25 | 0.28 |
| 格罗兹尼 (俄)  | 85.59 | 13.00 | 0.14 | 0.07 | 0.74 |
| 杜玛兹 (俄)   | 83.90 | 12.30 | 2.67 | 0.33 | 0.74 |
| 文图拉 (美)   | 85.00 | 12.70 | 0.40 | 1.70 | 1.20 |
| 宾夕法尼亚 (美) | 84.90 | 13.70 | 0.50 | —    | 0.90 |
| 墨 西 哥     | 84.20 | 11.40 | 3.60 | —    | 0.80 |
| 伊 朗       | 85.40 | 12.80 | 1.06 | —    | 0.74 |

## 2. 石油的烃类组成

石油中的两种主要元素碳与氢组成各种碳氢化合物（烃类）而成为石油的主要组分。这些碳氢化合物按其结构可分为三类：烷烃、环烷烃、芳香烃。

### (1) 烷烃

烷烃又名脂肪烃或石蜡烃，其通式为  $C_nH_{2n+2}$ ，属于饱和烃。

在常温常压下，含 1 个到 4 个碳原子的烷烃（记为  $C_1 \sim C_4$ ）呈气态，含 5 个到 16 个碳原子的烷烃（ $C_5 \sim C_{16}$ ）呈液态，含 17 个碳原子以上的烷烃呈固态。所有烷烃的相对密度均小于 1，难溶于水，易溶于原油及各种有

机溶剂。烷烃的密度、熔点、沸点均随相对分子质量的增大而增加（见表 1-2）。

表 1-2 几种正构烷烃的物理常数

| 名称  | 结构式  | 相对密度   | 熔点,     | 沸点,     |
|-----|--|--------|---------|---------|
| 甲烷  | CH <sub>4</sub>  | 0.4240 | - 182.5 | - 161.4 |
| 乙烷  | CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>                                  | 0.5462 | - 182.7 | - 88.6  |
| 丙烷  | CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>                  | 0.5824 | - 187.1 | - 42.2  |
| 丁烷  | CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>  | 0.5988 | - 138.3 | - 0.5   |
| 戊烷  | CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>  | 0.6263 | - 129.7 | 36.1    |
| 己烷  | CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>  | 0.6594 | - 95.3  | 68.7    |
| 十二烷 | CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> CH <sub>3</sub> | 0.7483 | - 9.6   | 216.2   |
| 十六烷 | CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> CH <sub>3</sub> | 0.7733 | 18.1    | 286.5   |

烷烃分子结构的特点是碳原子间均以单键排列成直链：—C—C—。其中无支链者称为正构烷烃，有支链者称为异构烷烃。

### (2) 环烷烃

具有三个以上碳原子的烃可以形成环状结构，其通式为 C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>，这种烃称为环烷烃。

环烷烃有单环的环烷烃，也有双环、三环等多环的环烷烃。石油中的环烷烃多为五元环（称环戊烷）与六元环（称环己烷）。

由于环烷烃碳原子的所有价键都已饱和，所以它与烷烃一样，都是比较稳定的。环烷烃的密度、熔点、沸点都比碳原子数相同的烷烃高，但其相对密度仍小于 1。

### (3) 芳香烃

具苯环结构（其通式为 C<sub>n</sub>H<sub>2n-6</sub>）的烃类化合物，因其具有特殊的芳香味，故称为芳香烃。它属不饱和烃。根据其结构不同，可以划分为单环芳烃（仅含一个苯环）、多环芳烃（含两个或两个以上独立苯环）和稠环芳烃（含两个或多个彼此相连的苯环）三类。例如：

单环芳烃：如苯、甲苯、二甲苯、乙苯等；

多环芳烃：如联苯、三苯甲烷等；

稠环芳烃：如萘、蒽、菲等。

在石油的低沸点馏分中，芳香烃含量较少，且多为单环芳烃，如苯、甲苯、二甲苯等。随着沸点升高，石油馏分中的芳香烃含量增多，除单环芳烃外，出现双环芳烃，如联苯。在石油的重质馏分中还可出现稠环芳烃，如萘和菲，但蒽的含量较少。

烷烃原油是生产汽油、柴油的重要原料，环烷烃原油与芳香烃原油则是生产润滑油和其他化工产品的宝贵原料。

原油中的某些烃类具有油源沉积物的“指纹”意义，例如某些长链烷烃、甾类、萜烯类，而最重要的指纹物质则是异戊间二烯型烷烃，其结构特点是在直链上每隔四个碳原子有一个甲基支链，犹如若干异戊间二烯分子加氢缩合而成。

在石油中，异戊间二烯型烷烃的含量可达 0.5%，已发现  $C_9$  至  $C_{25}$  之间规则的异戊间二烯型烷烃，其中以植烷、姥鲛烷、降姥鲛烷、异十六烷及法呢烷的含量最高（如图 1-1 所示）。石油中的类异戊间二烯型烷烃，一般认为是由叶绿素的侧链——植醇演化而来，其为生物成因标志化合物。由于同源的石油所含的异戊间二烯型烷烃的类型和含量都非常相似，因此常用作油源对比的指纹标志。

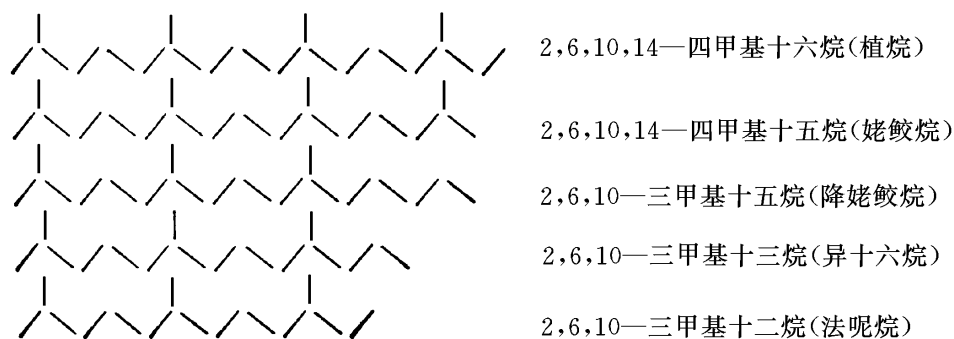


图 1-1 常见异戊间二烯型烷烃结构式

### 3. 石油的非烃组成

石油的非烃组分主要是含硫、含氮、含氧的化合物，此外还有某些金属的有机化合物。天然气中还可以有氢、氦、氩等非烃气体组分。

#### (1) 硫及含硫化合物

硫是组成石油的重要元素之一，几乎没有不含硫的石油。硫在石油中的含量变化很大，从万分之几到百分之几，但含硫量超过 3% 的原油已很少见。

原油中有很少一部分硫以元素硫（溶解态）或  $H_2S$  的形态存在（气藏中的硫则多以  $H_2S$  的形态存在），很大部分的硫则是与碳结合成有机化合物，如以硫醇（ $RSH$ ）、硫醚（ $RSR$ ）、二硫化物（ $RSSR$ ）、噻吩及其同系物等形态出现。

石油中所含的硫是一种有害的杂质，因为它容易产生  $H_2S$ ， $FeS$ ， $Fe(RS)_2$ ， $H_2SO_3$ ， $H_2SO_4$  等化合物，会对管道、机器、油罐、炼塔等金属设备造成严重腐蚀，所以石油中硫的含量高低是评价原油质量的一项重要指标。通常将含硫量大于 2% 的石油称为高硫原油，而将含硫量低于 0.5% 的

石油称为低硫原油，介于 0.5% ~ 2% 的石油称为含硫原油。一般含硫量较高的石油多产自碳酸盐岩系或靠近膏盐岩系的地层，而产自砂岩的石油则含硫较少。

### (2) 含氮化合物

石油中的氮含量一般在万分之几到千分之几。我国大多数油田原油含氮量低于 0.5% (大庆原油含 N 为 0.15%，孤岛原油含 N 为 0.47%)。

石油中的氮主要以氮的有机化合物形式存在 (气藏的天然气中可有  $N_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  存在)。石油中的含氮化合物包括碱性与非碱性两类。从石油中检出的碱性氮化物多为吡啶、喹啉、异喹啉和卟啉及其同系物，非碱性氮化物主要是吡咯、卟啉、吲哚和咪唑及其同系物。其中以金属卟啉化合物最为重要，它的分子中包含 4 个吡咯环，被 4 个 “—CH—” 基团相间连结而成 (如图 1-2 所示)。石油中的钒、镍等重金属都与卟啉分子中的氮呈络合状态存在，形成钒卟啉和镍卟啉。

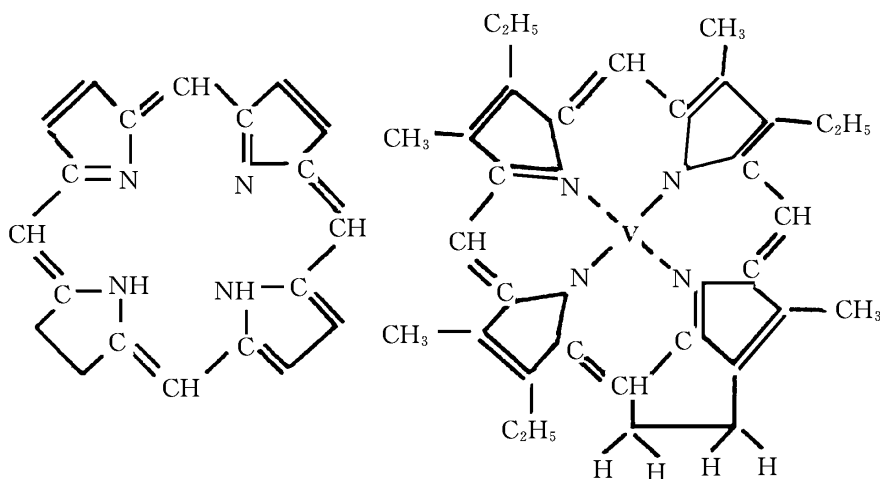


图 1-2 卟啉和钒 (镍) 卟啉的结构式

金属卟啉化合物大多数存在于沥青质中，少数分布于渣油的油分和胶质中。卟啉化合物在石油中的含量变化很大，例如以第三纪陆相生物为母质的东营凹陷，其边部样品几乎不含卟啉，而凹陷中部卟啉含量则达万分之几 (最高  $2\ 000 \times 10^{-6}$ )，这与沉积环境和埋藏深度等因素有关。

动物的血红素与植物的叶绿素都属卟啉化合物，前者为卟啉与铁的络合物，后者为卟啉与镁的络合物。它们与石油中的这类化合物结构相同，所以卟啉化合物对研究石油成因有重要意义。

### (3) 含氧化合物

氧在石油中均以有机化合物的状态存在 (在气藏中氧多以  $CO_2$  的形式存在)。石油中的含氧化合物可分为酸性氧化物和中性氧化物两类，前者包括环烷酸、脂肪酸及酚 (总称为石油酸)；后者包括醛、酮等，但含量较少。

在石油酸中，以环烷酸最重要，它约占石油酸总量的 90%。石油中的

环烷酸多为一元酸类（即一个羧基），常为环戊烷的衍生物，但高分子环烷酸则有双环、多环的环烷烃的衍生物。石油中的环烷酸含量因地而异，一般多在 1% 以下。环烷酸容易生成各种环烷酸盐类，石油中的微量元素大多与环烷酸结合成环烷酸盐的形态存在。

#### 4. 石油的馏分

石油是多种复杂化合物的混合物，而每一种化合物都有一定的沸点，因此用蒸馏的方法可以把石油中不同沸点的化合物分离切割出来。在不同温度下蒸馏出来的产品称为石油的馏分。显然，在石油蒸馏时，随着温度的升高，沸点低的馏分首先分离出来。切割馏分所用的温度因目的不同而有所差异，在石油炼制业界，各馏分的名称及温度大致见表 1-3。

表 1-3 石油的馏分（据潘钟祥等，1986）

| 馏分    | 轻馏分  |          | 中馏分       |           |           | 重馏分       |       |
|-------|------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|       | 石油气  | 汽油       | 煤油        | 柴油        | 重瓦斯油      | 润滑油       | 渣油    |
| 切割温度， | < 35 | 35 ~ 190 | 190 ~ 260 | 260 ~ 320 | 320 ~ 360 | 360 ~ 530 | > 530 |

汽油是 5 ~ 11 个碳原子的碳氢化合物的混合物，煤油是 9 ~ 16 个碳原子的碳氢化合物的混合物，柴油是 13 ~ 23 个碳原子的碳氢化合物的混合物。汽、柴、煤油三大产品是石油加工业的主要成品。

#### 5. 石油的组分

石油的组分是指组成石油的物质成分。由于组成石油的碳氢化合物种类复杂，用一般的方法分析石油的化合物常常发生困难。但根据其针对不同溶剂的溶解、吸附性质的不同，可用简便的方法将石油分离为性质不同的组分，即常说的油质、胶质、沥青质。这些组分的特征如下。

##### (1) 油质

油质是石油的主要组分。它是碳氢化合物（饱和烃及芳香烃）组成的淡色粘性液体，荧光显示为天蓝色。油质的溶解性最强，可以溶于石油醚、苯、氯仿、乙醚、四氯化碳、二硫化碳、丙酮和酒精中，不能被硅胶等吸附剂吸附。油质含量的高低是石油质量好坏的重要标志，油质含量高者，石油质量较好，其汽、柴、煤油产出量较高。

##### (2) 胶质

胶质是粘性的或玻璃状的半固体或固体物质，颜色由淡黄、褐红到黑色均有，其主要成分为芳香烃及含氧、硫、氮的非烃化合物。胶质的相对分子质量比油质的大，约为 500 ~ 1 200 左右。它的溶解性较差，只能溶解于石油醚、苯、氯仿、乙醚、四氯化碳等溶解性能较强的溶剂中。胶质的特性是能被硅胶吸附，据此可以把它与油质分开。胶质在荧光灯下显示黄色、棕黄

色或浅褐色荧光。密度较低的石油，其胶质含量一般在 4% ~ 5% 左右；而密度较高的石油，其胶质含量可以达到 20% 或更高。

### (3) 沥青质

沥青质是暗褐色至深黑色的脆性固体物质，它不溶于石油醚及酒精，而溶于苯、三氯甲烷及二硫化碳等有机溶剂，也可被硅胶吸附。沥青质为稠环芳烃和烷基侧链组成的复杂结构的高分子物质，其相对分子质量可达 50 000，甚至更高。沥青质显示褐色荧光。

## 二、石油的物理性质

石油的物理性质取决于它的化学组成。不同地区、不同层位，甚至同一层位在不同构造部位的石油，其物理性质都可能有很大的差异。

### 1. 颜色

石油颜色的变化范围很大，从近于无色、淡黄色、黄褐色、深褐色、黑绿色至黑色。石油的颜色深浅主要取决于其烃类组成及轻质组分与重质组分的含量多少。烷基石油通常为浅色，在透射光下呈黄—褐色；沥青基石油通常为褐色—黑色，其沥青质含量越高，颜色越深。石油中轻质组分含量越高，其颜色越浅；而重质组分含量增加，则颜色加深。因此，凝析油与轻质油的颜色均极浅，而高密度的重质原油、稠油的颜色均极深。从现有的资料看，世界上深色石油占绝大多数。

### 2. 相对密度

石油的相对密度变化相对较小，其 20℃ 脱气油相对密度一般介于 0.75 ~ 1.00 之间。相对密度大于 1.00 及小于 0.75 的石油，在自然界也有发现。例如，伊朗发现相对密度为 1.016 的石油，墨西哥发现相对密度为 1.06 的石油，我国孤岛油田馆陶组石油的相对密度达 0.93 ~ 1.026，前苏联苏拉汉石油的相对密度仅为 0.71。

相对密度高于 0.934 的石油划为重油 (heavy oil，又称稠油)，而相对密度低于 0.934 的石油称为稀油。我国稠油由于沥青质与金属元素含量较低而胶质含量较高，故粘度偏高而相对密度偏低，因此我国将稠油与稀油的相对密度界限划在 0.92。稀油的相对密度在 0.82 ~ 0.89 范围的居多。

石油的相对密度取决于其化学组成 (胶质、沥青质或大分子烃类含量) 及溶解气数量。烷基石油普遍较轻，沥青基石油几乎都是重油；轻质油与凝析油等重组分含量很少的原油相对密度很低；低溶解气油比的原油总是较重，而高溶解气油比的原油总是较轻。石油的相对密度与颜色有很好的相关性，浅色石油相对密度较小，而深色石油相对密度较高。

### 3. 粘度

粘度是石油的一个很重要的物理特性，它表征石油的流动性，从而影响

油层中石油的产量与管线中石油的输送量。石油粘度的高低严重影响油田的采收率与原油开采成本。

石油的粘度变化范围很大，可在小于  $1\text{mPa}\cdot\text{s}$  到数百万毫帕·秒的范围内变化。依据原油粘度的高低，可将石油划分为稀油和稠油两大类。

稀油：原油地下粘度（或油层温度下的地面脱气油粘度）小于  $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；

稠油：原油地下粘度（或油层温度下的地面脱气油粘度）大于  $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

其中，稠油又可依据原油地下粘度（或油层温度下的地面脱气油粘度）进一步划分为：

普通稠油： $100 \sim 10\,000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；

特稠油： $10\,000 \sim 50\,000\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；

超稠油：大于  $50\,000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

之所以给出油层温度下的地面脱气油粘度，是因为稠油的流动性差，多数稠油难以取到接近油层压力、温度条件下的高压物性样品，因而不易得到原油地下粘度资料。

石油粘度的高低与其组分及溶解气量有关。环烷烃及芳烃含量高的原油，粘度很高；重烃含量越大，粘度越高；原油中的溶解气量越少，其粘度越高。应当注意的是，石油粘度受温度影响很大，温度升高，粘度将大幅度降低。稠油热采即是利用石油的这一性质。相比之下，压力对粘度虽有影响，但要小得多。

石油的粘度与石油的颜色、密度有很好的相关性。随着重烃含量及相对分子质量的增大，石油的颜色加深、相对密度增高、粘度增大。

#### 4. 荧光性

石油及其产品，除轻汽油和石蜡外，无论其本身或溶于有机溶剂中，均可在紫外线照射下发光，称为荧光。石油发荧光是一种冷发光现象。发光现象可以分为“荧光”与“磷光”。前者当激发能停止后发光时间不超过  $10^{-7}\text{s}$ ，而后者在激发能停止后，继续发光的时间超过  $10^{-7}\text{s}$ 。

石油的发光现象取决于其化学结构。石油中的多环芳烃和非烃引起发光，而饱和烃则不发光。轻质油的荧光为浅蓝色；含胶质较多的石油，其荧光呈绿色和黄色；含沥青质多的石油及沥青则为褐色荧光。可见，发光颜色随石油或沥青物质的性质而变，不受溶剂性质影响；而发光强度则与石油或沥青物质的浓度有关。

由于石油的荧光现象非常灵敏，只要溶剂中石油或沥青物质含量达十万分之一，即可发光。因此，在油气勘探及地质录井中，普遍应用荧光分析来