



石油高职高专规划教材

油层物理

唐洪俊 崔凯华 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油高职高专规划教材

油 层 物 理

唐洪俊 崔凯华 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要讲述油层流体、储油气岩石、油层流体及储油气岩石饱和多相流体时的物理性质以及油层物理在油气勘探、开发和生产中的应用等内容,并附有思考题和习题。本书适合职业技术学院和高等专科学校油气开采、石油地质和油田应用化学等专业教学使用,也可供从事矿场地质、油藏工程和提高原油采收率等工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油层物理/唐洪俊,崔凯华主编.
北京:石油工业出版社,2007.7

石油高职高专规划教材

ISBN 978-7-5021-5947-4

I. 油…

II. ①唐…②崔…

III. 油气层物理化学—高等学校:技术学校—教材

IV. TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020468 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

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:14.25

字数:362 千字 印数:1—3000 册

定价:20.00 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

前 言

本书是根据石油工业出版社 2006 年 4 月的重庆科技学院会议讨论制定的高职高专《油层物理》教学大纲编写而成的。它可作为油气开采技术、石油地质和油田应用化学等专业的教科书和相近专业教学参考书,并可供油气矿场有关科技人员参考使用。

全书共分四章。第一章为油层流体的物理性质。在介绍储层流体——油、气、水的化学组成的基础上,重点讨论油、气相态特征,以及油、气、水高压物性参数的定义、特征、求取原理与计算方法等。第二章为储层岩石的物理性质。主要介绍油层岩石的构成,孔、渗、饱特征和胶结物性质等的描述方法,油层岩石常规物性的测定原理与方法。第三章为储层岩石中多相流体的渗流特性。从油层岩石以及其中流体的界面特征出发,着重讨论储层岩石毛管力理论、多相流体渗流理论;介绍毛管力曲线、相对渗透率曲线等的实验研究方法及其应用。第四章为油层物理在油气勘探和开发中的应用。通过介绍油层物理在找油中的作用、储集岩分类和评价、储集岩下限的确定方法、原油采收率的计算与影响因素、油藏物质平衡方程的建立、储集层岩石的敏感性评价、提高原油采收率方法、油层岩石模型与应用等内容,更深刻地认识到油层物理在油气勘探开发和生产中有着广泛的应用基础,并在石油多学科、多领域中所处的重要地位和作用。

在本书的编写过程中,我们根据石油高职高专的培养特点,根据多年来从事油层物理课程教学的经验,吸收了相关教材的优点和编写经验,又把目前国内外新技术、新内容予以充实和调整。教材内容在阐述基础理论的同时,注重应用例举,联系矿场实际,使本书更具石油高职高专特色。

本书由石油高职高专院校联合编写。绪论、第四章由重庆科技学院唐洪俊编写;第一章第一节至第四节由辽河石油职业技术学院崔凯华、田玉宇编写,第五节至第八节由大庆职业学院潘晓梅编写;第二章第一节至第四节由山东胜利职业学院张俨彬编写,第五节至第七节由承德石油高等专科学校高书香编写,第八节由唐洪俊和高书香编写;第三章第一节至第四节由天津工程职业技术学院刘玉刚、刘景江编写,第五节至第七节由渤海石油职业学院崔云生编写,第八节由新疆克拉玛依职业技术学院廖作才编写。全书由唐洪俊教授、崔凯华副教授任主编,刘玉刚副教授、崔云生副教授、张俨彬副教授任副主编。何行范教授担任本书主审,提出了许多宝贵的修改意见,在此表示感谢。

由于编写人员水平有限,书中难免存在不足之处,希望使用本教材的广大师生和读者提出批评和指正。

编 者

2006. 11

目 录

绪论	1
第一章 油层流体的物理性质	3
第一节 石油的组成与性质	3
第二节 油气系统的分离和溶解	8
第三节 油气藏烃类的相态特征	14
第四节 相态方程的基本概念	24
第五节 天然气的高压物理性质	30
第六节 地层原油的高压物性	45
第七节 地层水的化学组成与分类	51
第八节 地层流体高压物性参数的测算	56
思考与习题	68
第二章 储层岩石的物理性质	70
第一节 储层砂岩的构成	71
第二节 储层岩石的孔隙性	80
第三节 储层岩石中的流体饱和度	89
第四节 储层岩石的压缩性	94
第五节 储层岩石的渗透性	96
第六节 储层岩石渗透率的测定和计算	102
第七节 储层岩石的其他物理性质	106
第八节 碳酸盐岩的物理性质	109
思考与习题	115
第三章 储层岩石中多相流体的渗流特性	117
第一节 储层岩石中流体的表面张力	117
第二节 吸附作用及其与表面张力的关系	119
第三节 储层岩石的润湿性	121
第四节 储层岩石的毛管力	129
第五节 岩石毛管力曲线的基本特征与应用	136
第六节 相渗透率和相对渗透率	142
第七节 相对渗透率曲线的测定和计算	152
第八节 相对渗透率曲线的应用	159
思考与习题	163
第四章 油层物理在油气勘探和开发中的应用	165
第一节 油层物理在找油中的作用	165
第二节 应用油层物理参数对储集岩分类和评价	168
第三节 储集岩下限的确定方法	172

第四节 原油采收率的计算与影响因素..... 177
 第五节 用储集层流体物性参数建立油藏物质平衡方程..... 186
 第六节 储集层岩石的敏感性评价..... 189
 第七节 提高原油采收率方法简介..... 192
 第八节 剩余油饱和度与采收率..... 207
 第九节 油层岩石模型及应用..... 215
 思考与习题..... 219
 参考文献..... 221

绪 论

全球范围大规模地开发、利用石油和天然气资源已有一百多年的历史。石油和天然气已成为现代文明社会中不可缺少的物质材料之一，它已渗透到世界经济的各个领域。从世界各国油气勘探开发的经验分析，寻找油气资源、增加油气产量主要有两个途径：一是加大勘探力度，寻找新的油气田，增加油气后备储量；二是发展开采技术，提高现有油气田的采收率，增加油气产量。对于石油工作者来说，实现上述途径的基础是系统掌握油气勘探、开发技术和知识。

油层物理是用物理和物理化学的方法研究油层流体（油、气、水）、油层岩石以及流体在岩石中渗流机理的一门学科。主要包括：

- (1) 油层流体的物理性质；
- (2) 油层岩石的物理性质；
- (3) 饱和多相流体的油层的物理性质及多相渗流特性；
- (4) 油层物理在勘探、开发和生产中的应用。

处于高温高压状态下的地层原油中溶解有大量天然气，其性质与地面原油有很大的差异。油层岩石的性质在很大程度上决定着油、气、水在油藏岩石中的分布和流动规律，油、气、水的物化性质也影响其在多孔岩石中的流动状态。油、气、水在油藏中的分布和流动规律是油田开发的物理基础，是油田开发理论所研究的重要课题。

在勘探和开发初期所获取的流体和岩石物性资料，是判断油气藏类型、制订油田开发方案和设计的重要依据；开发过程中的动态分析、方案调整等工作，也离不开油层物理中静态和动态的物性资料；开发后期，研究剩余油分布、提高采收率措施等更需要油层物理的知识。可以说油层物理的知识贯穿于油气田开发的全过程。

油层物理作为一门学科的发展，距今有六七十年的历史。在 20 世纪 30 年代，美国 and 苏联等国家从事油气田开发的科技人员就初步进行了流体性质测试及测定方法的研究。1949 年美国人 M. 麦斯盖特所著的《采油物理原理》作为一个开端，1956 年苏联莫斯科石油学院 Ф. И. 卡佳霍夫所著的《油层物理基础》是油层物理从采油工程中独立出来，建立一个新学科的起点。

我国在 20 世纪 50 年代，北京石油学院聘请苏联专家首次开设了《油层物理》课程。随着我国大庆等油田的相继发现与开发，各大油田相继建立了研究院（所），建立了有关油层物理的各类实验室，开展各方面的油层物理试验研究和油田开发试验研究，以及提高油藏原油采收率的各种方法的试验研究，取得了大量的研究成果。从 20 世纪 60 年代起，我国相继出版了反映最新研究成果的有关油层物理的书籍，标志着我国油层物理科学研究得到快速的发展。今天，油层物理已成为我国油田开发中不可缺少的知识。随着油气田开发难度的增加，以及深部油气藏、高含水油藏、低渗油气藏的开发，它必将在我国油田开发工作中发挥更重要的作用。

20 世纪 70 年代国外有关油层物理研究的著作主要有 1972 年 G. V. 奇林加等著的《碳酸盐岩石油天然气开采》、1973 年 D. 威廉等出版的《石油流体性质》、前苏联学者斯麦霍夫

的《裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法》、1977年卡佳霍夫等新著的《油层物理学》和 И. Л. 马尔哈辛的《油层物理化学机理》等。

20 世纪末的研究和发展主要是在碳酸盐岩储层、碎屑岩、次生孔隙、油气流体的非牛顿性和相态方程应用等方面。油层物理今后的发展，将由于科学的发展与工程的需要，体现出综合性、创新性和工程性的特点，如工程性方面的测试和实验将朝着更真实的模拟油藏实际条件的方向发展。21 世纪的油层物理学科无论是在研究的深度还是广度上，都将进入一个崭新的阶段。

油层物理是石油高职、高专石油工程专业的一门主干专业基础课和必修课，也是油田化学专业、地质专业的一门重要专业基础课。它既要运用到许多基础理论，又在专业上有着广泛的实际应用。因此，学习油层物理的选修课程是数学、物理、化学、物理化学、流体力学、普通地质和热力学等。同时油层物理又是后继课程渗流力学、油藏工程、采油（气）工程、油田应用化学、提高油气采收率、保护储集层技术等专业的专业基础课程。

油层物理是一门建立在实验基础上的实践性很强的学科。从事实验研究是油层物理的一大特点。

学习本课程的目的是使学生掌握油层物理的基本理论、基本概念、基本知识、基本研究方法以及实验和计算的基本技能，为后继课程的学习和未来的工作打下坚实的基础。

第一章 油层流体的物理性质

所谓油层流体是指储存于地下的石油、天然气和地层水。这些流体在油层中处于高温、高压下，特别是其中的石油溶解有大量的天然气，地层水中也溶解一些天然气，并含有相当多的金属盐类，从而使处于地下的油层流体的物理性质与其在地面的性质有着很大的差别。

在地层条件下，油层流体尤其是油藏烃类处于平衡状态。但是，在油藏开发过程中，石油从油层流到井底，再从井底流到地面的过程中，随着压力、温度的降低，这一平衡被打破，从而引起一系列的变化——原油脱气、体积收缩、原油析蜡；气体体积膨胀、气体凝析出轻质油；地层水析盐，这一变化称之为离析和相态变化过程。这一变化过程，对于油藏动态分析、开发方案设计、采油工艺、提高油藏最终采收率等都有重要的影响。

本章主要讨论油层中油、气、水的物理性质；油、气相态变化及其变化规律、气体在原油中的溶解与分离，以及由此引起的原油性质变化；研究油藏烃类高压物性参数的获取方法及相态方程，为油田开发提供基础数据和资料。

第一节 石油的组成与性质

石油与天然气从化学组成上讲属于同一类物质，即油藏烃类。它主要由烷烃、环烷烃和芳香烃这三种饱和烃类组成。在天然油气藏中，以烷烃最为多见。烷烃又称石蜡族烃，其化学通式为 C_nH_{2n+2} 。烷烃由于其相对分子质量大小不同，存在的形态也不同。在常温常压（20℃，0.101MPa）下， $C_1 \sim C_4$ 的烃类为气态，它们是构成天然气的主要成分； $C_5 \sim C_{16}$ 的烃类为液态，它们是石油的主要成分； C_{16} 以上的烃类为固态，它们是石蜡的主要成分。

一、石油的组成

石油的化学组成包括饱和烃类化合物（烷烃、环烷烃和芳香烃）和非烃类化合物（氧、硫、氮的化合物）。石油中烃类化合物和非烃类化合物的相对含量，因产地不同，差别也很大，有的烃类含量可达 90% 以上（轻质石油），但有的烃类含量低于 50%，甚至低至 10%~15% 左右（重质石油）。

1. 石油中的烃类化合物

石油中的烃类化合物包括烷烃、环烷烃和芳香烃三种饱和烃类，一般不含有非饱和烃类，如烯烃、炔烃。

1) 石油中的烷烃

在石油中带有直链或支链，但没有任何环结构的饱和烃，称之为烷烃（或链烃）。烷烃的化学性质比较稳定，在一般情况下不易发生反应。但在加热或催化剂以及化学作用下，烷烃能起各种反应，如卤化、碘化、氧化以及裂化反应。

石油中的烷烃包括正构烷烃和异构烷烃。正烷烃一般含量都很高，尤其是石蜡基原油，其正构烷烃含量往往大于同碳数的所有异构烷烃含量的总和。但对于沥青基的原油，其正烷烃含量较低。

在异构烷烃中，以带有两个或三个甲基的衍生物含量较多，而带四个甲基及其他高分支的异构烷烃的含量较少。

2) 石油中的环烷烃

环烷烃是环状的饱和烃，其化学性质也比较稳定，是石油主要成分之一。石油中的环烷烃多为五碳环的环戊烷系和六碳环的环己烷系。

石油中的环烷烃除了单环环烷烃外，还含有双环及多环环烷烃。

3) 石油中的芳香烃

石油中的芳香烃多为苯系芳香烃。

2. 石油中的非烃类化合物

石油中的非烃类化合物（俗称非烃类）是指各种氧、硫、氮的化合物所组成的复杂混合物，它们都是极性物质。

含氧化合物——环烷酸、苯酚和脂肪酸等；

含硫化合物——硫化氢、硫醇、硫醚和噻吩等，此外石油中还含有元素硫；

含氮化合物——吡咯、吡啶、喹啉、吲哚和咔唑等杂环化合物；

胶质和沥青质——高分子杂环的氧、硫、氮化合物，具有较高或中等的界面活性，它们对石油的许多性质，如颜色、密度、粘度和界面张力等都有较大的影响。了解这类化合物的性质对提高原油采收率尤为重要。

二、原油的物性与分类

1. 原油的物理性质

原油的物理性质指颜色、密度、粘度、凝固点、发热量、荧光性、旋光性等。这里所讲述的内容，侧重于地面商品原油的物理性质。

1) 颜色

石油一般呈棕褐色、黑褐色、黑绿色，也有黄色、棕黄色和浅红色。原油颜色的不同，主要与原油中轻、重组分及胶质和沥青质的含量有关，重组分含量越多，颜色越深。所以，原油颜色的深浅大致反映了原油中重组分含量的多少。

2) 密度与相对密度

原油的密度是指单位体积原油的质量，其数学表达式为

$$\rho_o = \frac{m_o}{V_o} \quad (1-1)$$

式中 ρ_o ——原油的密度，g/cm³ 或 kg/m³；

m_o ——原油的质量，g 或 kg；

V_o ——原油的体积，cm³ 或 m³。

我国和前苏联习惯上将地面原油的相对密度定义为在常温、常压（20℃、0.101MPa）下，原油的密度与 0.101MPa、4℃时纯水的密度之比，其数学表达式为

$$d_4^{20} = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (1-2)$$

式中 d_4^{20} ——地面原油在 0.101MPa、20℃下的相对密度，无单位；

ρ_o ——原油在 0.101MPa、20℃下的密度，kg/m³；

ρ_w ——纯水在 0.101MPa、4℃下的密度，kg/m³。

欧美国家则以 0.101MPa、15.6℃时原油的密度与 0.101MPa、4℃时纯水的密度之比，用 γ_o 表示。由于温度条件不同， γ_o 与 d_4^{20} 意义不同，其数值也不同。两者关系为 $\gamma_o \approx (1.002 \sim 1.004) d_4^{20}$ 。

欧美国家还常以 API (America Petroleum Institute——美国石油学会) 重度表示相对密度，它与 γ_o 的关系为

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5 \tag{1-3}$$

3) 凝固点

原油的凝固点是指原油冷却过程中失去流动性时的临界温度。它与原油中含蜡、胶质、沥青质及轻质油含量有关，影响因素十分复杂。轻组分含量高，凝固点低；重组分含量高，尤其是石蜡含量高，凝固点就高。原油凝固点一般在 -56~50℃ 之间。凝固点高于 40℃ 的原油称为高凝油。

4) 粘度

粘度是流体流动时内部摩擦而引起的阻力大小的量度。粘度的高低表明了流体流动的难易，粘度越大，流动阻力越大，越难流动。粘度的常用单位为毫帕秒 (mPa·s)。

原油除上述物理性质外，还有发热量、荧光性、旋光性等性质，在此不再一一叙述。表 1-1 给出了我国部分油田的原油性质。

表 1-1 我国部分油田的原油性质

产地 性质	大庆 原油	胜利 原油	任丘 原油	辽河 原油	新疆黑油 山原油	克拉玛依 3 号低凝油	胜利油田 孤岛原油	大港羊三 木原油
相对密度 d_4^{20}	0.8554	0.9005	0.8837	0.8662	0.9149	0.8839	0.9495	0.9437
粘度 (50℃), mPa·s	17.3	75.1	50.5	7.8	316.2 ^①	29.2	316.8	595.8
凝固点,℃	30	28	36	17	-22	-54	2	-4
含蜡量 (吸附法),%	26.2	14.6	22.8	13.5 ^②	0.77	1.05	4.9	—
沥青质, %	0	5.1	2.5	0.17	1.36	0.53	2.9	0.4
胶质, %	8.9 ^③	23.2	23.2	14.4	21.2	13.3	24.8	21.8
残炭 (电炉法), %	2.9	6.4	6.7	3.59	5.3	3.8	7.4	6.0
备注	中高密度原油				低凝点、高密度原油			

注：①40℃时的粘度；
②蒸馏法；
③氧化铝吸附色谱的分析数据。

2. 分类

1) 地面原油的分类

(1) 按胶质—沥青质含量分类。

- ①少胶原油——原油中胶质—沥青质含量在 8% 以下；
- ②胶质原油——原油中胶质—沥青质含量在 8%~25%；
- ③多胶原油——原油中胶质—沥青质含量在 25% 以上。

原油中胶质—沥青质的含量及形成的胶体结构，对原油的流动性有很大的影响，可形成高粘度的原油（稠油、高稠油）等。

我国油田产出的原油多属于少胶原油或胶质原油。

(2) 按含蜡量分类。

- ①少蜡原油——原油中含蜡量在 1% 以下；
- ②含蜡原油——原油中含蜡量在 1%~2%；
- ③高含蜡原油——原油中含蜡量在 2% 以上。

原油中含蜡多少直接影响其凝固点，一般含蜡量越高，其凝固点越高。凝固点越高，给石油的开采和集输带来的麻烦就越大。

我国各油田生产的原油含蜡量相差很大，有的属于少蜡原油，但多数属于高含蜡原油。

(3) 按含硫量分类。

- ①少硫原油——原油中含硫量在 0.5% 以下；
- ②含硫原油——原油中含硫量在 0.5% 以上。

原油中若含有硫，则对人畜有害、腐蚀钢材，对炼油也不利，经燃烧生成的二氧化硫会污染环境。为此，欧美国家规定石油产品必须清除硫以后才能出售。

我国生产的原油，多属于少硫原油。

(4) 按相对密度分类。

表 1-2 是国际上按原油的品位质量的分类方法，我国大多数油田属于中质或重质品位。

表 1-2 原油按密度分类

分 类	γ_4	$^{\circ}API$
轻质油	<0.855	<34
中质油	$0.855\sim0.934$	$34\sim20$
重质油	>0.934	>20

表 1-3 和表 1-4 分别给出国内外油田的地面原油性质。

表 1-3 我国一些油田的原油性质

性质	相对密度 d_{4}^{20}	50℃粘度 $mPa \cdot s$	凝固点 $^{\circ}C$	含蜡 %	胶质 %	沥青 %	含硫 %	残炭 %	馏分组成, %		
									初馏点	$<200^{\circ}C$	$<300^{\circ}C$
大庆油田 S 区	0.8753	15.2	24	28.6	13.3	—	0.15	2.5	88	14	28
胜利油田 T 区 S ₂ 层	0.8845	33.3	33	17.9	18.3	3.1	0.47	5.5	79.5	9	20
胜利油田孤岛 G 层	0.9547	408.1	-12	0	27.5	6.6	2.25	8.95	15.8	1.9	11.2
大港油田 M 层	0.9174	47.7	-12	6.17	13.98	6.27	0.13	4.81	97	40	20.5
克拉玛依油田	0.8699	16.7	-50	2.04	12.6	0.01	0.13	3.7	58	18	35
玉门油田 L 层	0.8580	11.1	-15.5	8.3	22.6	—	—	—	—	—	—
江汉油田 W 区 C ₃ 层	0.9744	—	21	3.8	51	9.6	11.8	9.5	89	5	218
辽河油田 C 区 S ₁ 层	0.9037	33.8	-7	4.73	17.6	0.15	0.26	6.4	—	—	—
川中油田	0.8394	10.3	30	18.1	3.4	—	—	—	—	—	—
任丘油田 P ₂ 层	0.8893	56.5	33	22.6	20.7	—	2.35	—	148	—	—

2) 地层原油分类

地层油的分类主要是按其粘度进行划分。原油的粘度是地层油的主要物性之一，它决定着油井产能的大小、油田开发难易程度、开采方式及油藏最终采收率。

按粘度将地层油划分为：

低粘油——指油层条件下粘度小于 5mPa·s 的原油。

表 1-4 部分国外油田的原油性质

性质	相对密度 %	粘度 mPa·s	温度 ℃	凝固点 ℃	含蜡 %	胶质 %	沥青 %	含硫 %	残炭 %
哈西—迈乌得油田（阿尔及利亚）	0.804	2.769	20	-45.5	2.40	0	0.06	0.13	0.83
基尔库克油田（伊拉克）	0.844	4.61	20	-36	3.90	—	1.5	1.95	3.8
欣塔油田（印度）	0.856	23.7	50	43.3	29.3	—	19.5	0.08	—
玻牟油田（尼日利亚）	0.78~0.95	4.4	37.3	17.78	5.10	—	—	0.16	—
阿加贾里油田（伊朗）	0.852	6.56	21	—	中等	—	0.60	1.42	—
帕那油田（加拿大）	0.8988	—	—	10.0	—	—	—	0.29	1.76
东得克萨斯油田（美国）	0.827~0.835	3.4	15.6	—	—	—	—	0.21	—
罗马什金诺油田（前苏联）	0.868	7.3	50	-38.89	4.30	—	—	1.61	—

中粘油——指油层条件下粘度在 5~20mPa·s 之间的原油。

高粘油——指油层条件下粘度在 20~50mPa·s 之间的原油。

稠油——指油层条件下粘度大于 50mPa·s，相对密度大于 0.920 的原油。稠油又分 3 大类 4 级，见表 1-5。

表 1-5 稠油分类方法

稠油类别			主要指标	辅助指标	开采方式
类别	级别		粘度, mPa·s	相对密度	
普通稠油	I	I—1	50~150	>0.92	注水、热力采油
		I—2	150~10000 ^①	>0.92	热力采油
特稠油	II		10000~50000 ^①	>0.95	热力采油
超稠油	III		>50000 ^①	>0.98	热力采油

注：①地面粘度，其他为地下粘度。

凝析油——地层条件下为气相烃类，开采时当压力降到露点压力后凝析出液态的烃即轻质油，一般相对密度小于 0.82。

挥发油——地层条件下为液态，相态上接近临界点，在开发过程中挥发性强，收缩率高。气油比一般在 210~1200m³/m³ 之间，相对密度小于 0.825。

高凝油——指凝固点高于 40℃ 的高含蜡原油。

三、油气藏的分类

按油气藏内流体组成及相对密度，将油气藏划分为：

气藏——以干气甲烷为主，还含有少量的乙烷、丙烷和丁烷。

凝析气藏——含有甲烷到辛烷的烃类，它们在地下原始条件下为气态。在开采过程中，随着地层压力的降低，或到地面后会凝析出液态烃。液态烃的相对密度一般在 0.6~0.7，颜色浅，称凝析油。

临界油气藏——也称挥发油气藏。其特点是天然气中重组分含量高、原油中轻组分含量高，构造上部接近于气、下部接近于油，油气之间无明显分界面，相对密度在 0.7~0.8。

这类油气藏并不多见，但在英国北海、美国东部及我国吉林等地已有发现，原油具有挥

发性，也属于特殊油气藏之列。

油藏——常分为饱和油藏（带气顶）和未饱和油藏（不带气顶），油藏中以液相烃类为主，其中溶有大量的天然气。相对密度一般在 0.8~0.94。在油藏数值模拟中常将油藏中的原油称为黑油。

重质油藏——又称稠油油藏。按 1983 年在伦敦召开的第 11 届世界石油会议上所定的标准，是指其地面脱气原油相对密度为 0.934~1.00，地层温度条件下测得脱气原油粘度为 100~10000mPa·s 者。原油粘度高、相对密度大是该类油藏特点。

不同学者根据不同的标准及划分界限对油气藏分类也不尽相同，表 1-6 也是一种常用的油气藏分类方法。

表 1-6 按地层流体性质划分的界限对油气藏分类（据陈元千，1987）

类 别	气油比 m ³ /m ³	天然气甲烷含量 %	凝析油含量 cm ³ /m ³	地面液体密度 g/cm ³
天然气	>18000	>85	<55	0.70~0.80
凝析气	550~18000	75~90	55~1800	0.72~0.82
轻质油	250~550	55~75	—	0.76~0.83
黑油	<250	<60	—	0.83~1.0

第二节 油气系统的分离和溶解

油藏烃类的相态变化是气液两相间的转化与平衡的结果。这种平衡和转化又总是以油气的溶解和分离的方式表现出来。

一、天然气从原油中的分离

油气分离是生产过程中伴随着流体压力降低而出现的原油脱气现象，它可能发生在地层中、井筒流动过程中或地面油气输运过程中。在实际油气生产中，由于降压的方式及条件不同，油气的分离方式通常有两种基本类型——一次脱气和多级脱气。

1. 一次脱气

一次脱气又称闪蒸分离、接触分离或接触脱气。即在油气分离过程中分离出的气体与油始终保持接触，油气体系的总组成不变。图 1-1 是用 PVT 筒进行一次脱气实验的示意图，活塞向下运动则体系压力降低，反之则压力升高。

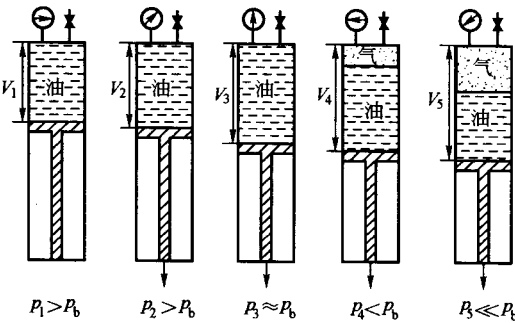


图 1-1 接触脱气过程示意图

在实验室内进行油气体系的降压脱气试验时，由地层压力开始逐渐降压、脱气，测定体系的 $p-V$ （压力—体积）关系如图 1-2 所示，直至压力降至大气压，并达到气液相平衡。

从 $p_1 \sim p_5$ 整个降压过程中，油气体系一直接保持接触，气体不排出，油气系统的总组成始终不变。这是一次脱气的特点，也是称为接触脱气的原因。

含气原油在降压过程中刚刚分离出气体时所对应的压力称为饱和压力 p_b 。

由 $p-V$ 关系曲线看出：当压力降至 p_b 以前，压力降低仅仅是使液相体积膨胀。所以 $\Delta V/\Delta p$ （曲线斜率）小，而当压力低于 p_b 后，由于有气体分出，使得 $\Delta V/\Delta p$ 值（曲线斜率）比未脱气前的 $\Delta V/\Delta p$ 大得多，故两条斜率不同的直线的交点，即为开始脱气之点。该点所对应的压力即是饱和压力 p_b 。

测量出大气压力下脱出的气体总体积 V_g （ m^3 ）和地面油体积 V_o （ m^3 ），则可求得一次脱气的气油比 $R_s = V_g/V_o$ 。

在油田矿场，一次脱气方式相当于油井产出物直接进入分离器或储罐，油气瞬间达到相态平衡。一般用这种方式分离出的气量较多，亦即气油比高，而且分离出的气体较重，气体中含轻质油较多。为了减少轻质油的损耗，获得更多的地面原油，则采取多级脱气的分离方式。

2. 多级脱气

所谓多级脱气（差异分离），即在脱气过程中，分多次降低压力，直至降到最后指定的压力（如大气压）时为止。每一降低压力所分离出来的气体都及时地从油气系统中定压排出，并测定每一级分离出的气体体积，进行累加得到多级脱气的总气量 V_g （ m^3 ），同时测出大气条件下地面油的体积 V_o （ m^3 ），则可求得多级脱气的气油比 $R_s = V_g/V_o$ 。多级脱气过程示意图如图 1-3 所示。

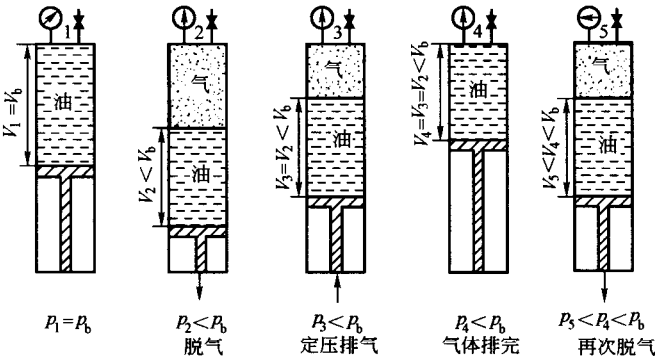


图 1-3 多级脱气过程示意图

矿场多级脱气流程示意图如图 1-4 所示。图中（a）为二级脱气，第二级平衡压力为大气压力。第一级平衡压力高于第二级。图中（b）为三级脱气，此时第三级为大气压力，第二级、第一级压力依次提高。

3. 一次脱气与多级脱气的比较

实验和理论表明：从油中分离出来气体的数量与组成除了与脱气温度、压力以及油气组成本身有关外，还与脱气方式有关。同一个地层油样品，在相同的温度和压力下进行脱气试验，由于其脱气方式不同，所脱出的气量不同，脱出气的密度以及油的密度也不同，见表 1-7 和表 1-8。

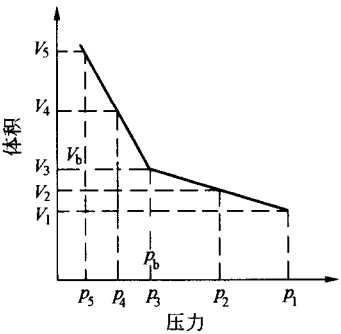


图 1-2 接触脱气过程 $p-V$ 关系曲线

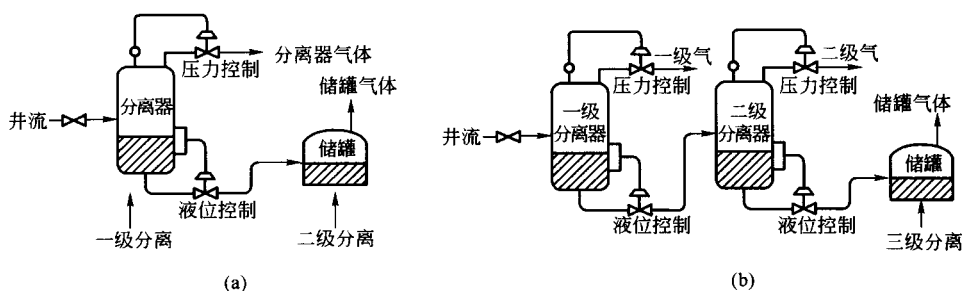


图 1-4 矿场多级脱气流程图

表 1-7 脱气方式对脱出气量的影响

油田 (井底油样)	气油比, m^3/m^3		两种脱气方式所得 气量的相对差, %
	一次脱气	多级脱气	
罗马什金	59.6	41.4	30.6
次不仁斯克	83.0	71.5	13.9
新季米特里耶夫斯克	175.4	144.5	17.6

表 1-8 某油样一次脱气与多级脱气效果对比

脱气方式	温度 $^{\circ}\text{C}$	平衡压力 MPa	气油比 m^3/m^3	脱气油相对密度 (15.5 $^{\circ}\text{C}$)	气体相对密度 (15.5 $^{\circ}\text{C}$)
一次脱气	25	0.1	273	0.7711	0.9737
两级脱气	25	一级 0.5	229	0.7807	0.8559
		二级 0.1	10.3		

注：该原油饱和压力为 126MPa，地层温度 82 $^{\circ}\text{C}$ 。

从表 1-8 中可以看出：通常一次脱气比多级脱气所分离出的气量多，而油量少，亦即测出的气油比高；而且一次脱气分出的气相对密度较高，说明气体中含轻质油较多。

出现这种情况的原因是：一次脱气时油气始终接触而达到相平衡，故不管重烃和轻烃均按各自的平衡比 $K_i = Y_i/X_i$ 的比例大小而进入气相中。这样，较重的烃类由于热力学平衡也有进入气相的机会，故使得分出的气量多且相对密度大。相反，当进行多级分离时，每次都首先将容易逸出的轻组分气体排走，其结果使得轻烃每次都先“跑掉”而留下较重烃。这样，由于重烃在液相中的含量增加，所以多级脱气时分离出的气量小，相对密度低。

4. 油田开发和生产中的脱气过程

1) 地层中

当油藏在压力低于饱和压力下进行开采时，脱气过程比较复杂。一般油层中的脱气是介于接触分离和微分离两种脱气方式之间。一方面地下脱气过程接近于微分脱气，因为气从油中脱出后，气、液存在流速差，分离出的气与油脱离接触，这一过程接近于微分分离。但另一方面气体却始终与岩石孔隙中的原油接触，这又与接触分离的条件相似。

对于厚度较大、垂直渗透性较好的油藏，降压脱气后由于油、气重力差异而形成次生气顶的过程，接近于接触分离。

无论如何,油藏中的脱气过程可能落后于压力降落的速度(滞后现象),而且多孔介质岩石中的脱气过程比实验室内的脱气过程更为复杂,造成室内测定与实际脱气的过程有一定差异。

实际油藏中由于渗流形成压力梯度,油藏中各部位的压力不相等。一些区域压力低于饱和压力后,任何微小的压力降低,气体就会再次脱出。此时,局部地层压力就是目前的饱和压力。在油藏数值模拟中,将饱和压力作为一个随时间、位置而变化的参数来处理。

2) 油井中

当气相流速与液相流速差别不大时,油井中的脱气过程与接触脱气过程较为接近。因为当地层油从井底向井口流动过程中,压力越来越低,使气不断从油中分离出来。这一脱气过程在井筒中不断进行着,同时在井筒中油气接触的时间也较长,这就足以建立起热力学平衡。

当存在明显的油、气相对运动,出现气体超越原油而过的“滑脱”现象时,油井里的脱气过程常常是介于接触分离和微分分离两种脱气方式之间。所以,可以说在油田开发实践中,纯粹的、严格意义上的接触分离或微分分离是不存在的。

3) 地面储运过程中

地面油气分离是比较理想的分离过程,常用的二级、三级分离就是多级脱气分离,而一次分离就是接触分离。

二、天然气向原油中的溶解

与地面油相比,地层油一个重要的特点就是溶解有天然气。天然气的分离和溶解是烃类体系随压力变化所发生的气、液转换,它们是相态变化的两个方面。从地层油的角度看,是天然气从地层油分离的过程;而从地面油来看,是天然气在地面原油中的溶解。讨论天然气的溶解,可加深对分离过程的理解。

1. 天然气在原油中的溶解度和溶解系数

由物理化学知道,单组分气体在液体中的溶解服从亨利定律,即在温度一定时,溶解度和压力成正比,这可表示为

$$R_s = \alpha \cdot p \quad (1-4)$$

式中 p ——溶解时的体系压力, MPa;

α ——溶解系数,表示单位压力、单位体积液体中溶解气量(标准状态下的体积), $\text{m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{MPa})$;

R_s ——溶解度, m^3 / m^3 。

天然气在石油中的溶解与一般的单组分气体在液体中的溶解有很大的不同。其在原油中溶解度的大小取决于压力、温度、天然气和原油的组成等。

2. 溶解度与压力的关系

溶解度反映了液体中溶解气量的多少,而溶解系数则反映了液体溶解气体的能力。如果溶解系数为常数,则溶解度与压力成线性关系。但对于天然气在原油中的溶解来说,特别是对于重烃含量高的天然气在石油中溶解,则与亨利定律有很大的偏差,表现为不同压力下的溶解系数不同。