

石油技工学校统编教材

石油开发地质

中国石油天然气总公司劳资局组织编写



石油工业出版社

登录号	228897
分类号	TE14
种次号	018

石油技工学校统编教材

石油开发地质

中国石油天然气总公司劳资局组织编写



石油大学 0225972

石油工业出版社

7088SS	号长登
41-5T	号类代
810	号次特

内 容 提 要

本书主要介绍了油层物理、渗流、储量分级、地层压力及驱动、试油、试气、油田开发、动态分析、油层保护和提高采收率等内容，最后对采油地质图的绘制也作了详细介绍。本书除了可作石油技工学校钻采地质专业的教材外，也可供现场采油、地质工作者参考。

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

石油开发地质/中国石油天然气总公司劳资局组织编写.
北京:石油工业出版社,1998.3
石油技工学校统编教材
ISBN 7-5021-2215-X

I. 石…

II. 中…

III. 石油开采-工程地质-技术学校-教材

IV. TE14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 00696 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 10 $\frac{3}{4}$ 印张 266 千字 印 1—2000
1998 年 3 月北京第 1 版 1998 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2215-X/TE·1857

定价: 14.00 元

目 录

第一章 油层物理基础 (1)

本书是根据 1996 年 4 月中国石油天然气总公司劳资局审定的石油技工学校《石油开发地质》大纲编写而成的。作为石油技校地质专业的试用教材,内容紧扣石油技校培训八级以上工种内容。

全书共分十章,主要内容涉及到油层物理、油田开发、油层保护、试油、试气、提高采收率以及采油地质绘图等。在教学过程中,各学校可根据实际情况作适当的增减。

参加本书编写的有南阳石油技校乔应龙(第一章),四川石油技校卓炽明(第二章),新疆石油技校徐长新(第三章),吉林石油技校于连录(第四章)、赵乾玉(第六、七、八章),刘连生(第九章),四川石油技校黄菊芳和玉门石油技校张健民(第五章),东北勘测设计研究院黄俊(第十章)。全书由赵乾玉任主编,负责统稿。

在本书的编写过程中,得到吉林石油集团公司总地质师周受超同志的大力帮助,他对本书的编写大纲提出了宝贵意见。在此,特致以深切的谢意。

由于编者水平有限,难免出现差错,恳切希望读者提出宝贵意见。

编 者

1997 年 7 月

第一章 油层物理基础	(1)
第一节 油层岩石的孔隙性	(1)
第二节 油层岩石的渗透性	(8)
第三节 油层岩石的毛细管性	(15)
第四节 天然气的储量计算	(53)
复习思考题	(61)
第二章 地层压力、地层温度、油层驱动类型	(62)
第一节 油气层压力	(63)
第二节 油气层温度	(68)
第三节 油层驱动类型	(69)
复习思考题	(71)
第三章 试油、试气地质	(72)
第一节 试油地质	(72)
第二节 试油的一般程序	(73)
第三节 试气地质	(78)
第四节 气井的不稳定试井	(82)
第五节 油井试井	(86)
复习思考题	(94)
第四章 油田开发	(95)
第一节 油田开发阶段的划分	(95)
第二节 油田开发方案的编制	(97)
第三节 开发方案的编制	(99)
第四节 注水方式	(100)
第五节 配产配注方案的编制	(104)
第六节 生产指标	(108)
第七节 产量递减规律	(112)

目 录

第一章 油层物理基础	(1)
第一节 油层中流体的物理性质	(1)
第二节 储油岩层的物理性质	(10)
第三节 储油岩层的渗流特性	(24)
复习思考题	(34)
第二章 油气渗流的基本知识	(36)
第一节 渗流及其基本规律	(36)
第二节 液体的平面径向流	(39)
复习思考题	(48)
第三章 石油和天然气储量的计算	(50)
第一节 工业油、气流的标准	(50)
第二节 石油储量分级	(51)
第三节 石油的储量计算	(53)
第四节 天然气的储量计算	(58)
复习思考题	(61)
第四章 地层压力、地层温度、油层驱动类型	(62)
第一节 油气层压力	(62)
第二节 油气层温度	(68)
第三节 油层驱动类型	(69)
复习思考题	(71)
第五章 试油、试气地质	(72)
第一节 试油地质	(72)
第二节 试油的一般程序	(73)
第三节 试气地质	(78)
第四节 气井的不稳定试井	(82)
第五节 油井试井	(86)
复习思考题	(94)
第六章 油田开发	(95)
第一节 油田开发阶段的划分	(95)
第二节 油田开发方案的编制	(97)
第三节 开发层系的划分	(99)
第四节 注水方式	(100)
第五节 配产配注方案的编制	(104)
第六节 生产指标	(108)
第七节 产量递减规律	(112)

第八节 油田开发后期的稳产方法·····	(114)
第九节 油田开发方案的管理·····	(115)
第十节 油藏描述方法·····	(116)
复习思考题·····	(118)
第七章 油田动态分析及监测 ·····	(119)
第一节 油田动态分析·····	(119)
第二节 生产动态分析·····	(122)
第三节 油田动态监测·····	(124)
第四节 油水井地质管理·····	(125)
复习思考题·····	(129)
第八章 油气层的伤害及保护 ·····	(130)
第一节 油气层的伤害机理·····	(130)
第二节 钻井及完井对油气层的伤害·····	(131)
第三节 射孔对油气层的伤害·····	(132)
第四节 完井作业对油气层的伤害·····	(133)
第五节 油田注水对油气层的伤害·····	(134)
第六节 采油及增产措施对油气层的伤害·····	(136)
复习思考题·····	(139)
第九章 提高采收率的方法 ·····	(140)
第一节 影响采收率的因素·····	(140)
第二节 提高采收率的方法·····	(142)
第三节 三次采油的现状·····	(150)
复习思考题·····	(152)
第十章 采油地质图的绘制 ·····	(153)
第一节 井位图的绘制·····	(153)
第二节 构造图的绘制·····	(155)
第三节 小层平面图的绘制·····	(156)
第四节 油层连通图的绘制·····	(158)
第五节 开采现状图的绘制·····	(161)
第六节 注采平衡图的绘制·····	(163)
第七节 总开采曲线图的绘制·····	(164)
复习思考题·····	(166)
附录 ·····	(166)
参考文献 ·····	(166)

第一章 油层物理基础

埋藏在地下深处岩层孔隙和裂隙之中的天然气、石油和油层水，同一般的固体矿产不同，是流体。在开采油气田时，当钻开油层后，油、气、水就从油层中源源不断地喷出地面或流入井中。为了有效地开发天然气和石油，我们有必要研究油气和油层水在地下静止和流动的状态，以及在岩石孔隙和裂隙中的储集特征，以期获得较高的经济效益。

天然气，石油和油层水在油层孔隙和裂隙中，处于高温高压下，保持一定的化学平衡和相平衡，油中溶有大量的天然气，油层水中又溶有天然气和盐类，同地面常温常压下的气、油、水有明显的不同。油层的性质直接决定了气、油、水的储集数量和流动能力。油层的主要性质包括孔隙性、渗透性和含油性。在油藏开发过程中，油层中经常出现气、油、水的三相流动，出现错综复杂的流体之间以及流体和孔隙之间的界面关系，影响着油气的最终采收率，所以要研究微观的孔隙结构、微观的渗透特性以及岩石和流体的相互作用。

第一节 油层中流体的物理性质

油层中的流体包括天然气、石油和油层水。这里主要讨论它们在油层中处于高温高压条件下的物理性质。

一、天然气的高压物理性质

广义地讲，地层中的气体都可称为天然气，但是习惯上所称的天然气专门指油藏烃类气体及含少量非烃类气体的混合物。通常是以溶解状态存在于石油之中，或以游离状态存在于油藏顶部。

1. 天然气的组成

天然气以烃类气体为主要成分，其气体混合物中有甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})和汽油蒸气(C_6H_{14})，还有少量的(N_2)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)及硫化氢(H_2S)等杂质。

天然气按矿藏分类，可分为气田气、油田气和凝析气田气。气田气主要含有甲烷，含量占80%以上。乙烷至丁烷含量不大，戊烷以上的重烃含量较少甚至不含。油田气包括含溶解气和气顶气，也称伴生气。它的特点是乙烷和乙烷以上的烃类含量较气田气高。从凝析气田采出的天然气，除含大量甲烷外，戊烷及戊烷以上的烃类含量较气田气高。

2. 天然气的分子量、密度和相对密度

(1) 分子量

天然气是多组分的混合气体，其分子量的定义是在温度为 0°C ，压力为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 的条件下，体积为22.4L($22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3$)的天然气所具有的重量。天然气的组分不同，其分子量也不同。天然气的组分相同，而各组分含量的百分比不同，其分子量也不同。

天然气的分子量是按天然气的组分和每种组分含量的百分数计算的。

若已知其中各气体组分的体积百分数，则天然气的分子量为

$$M_{\text{混}} = \sum_{i=1}^n (m_i \times y_i) \quad (1-1)$$

式中 m_i ——天然气组分 i 的分子量;

y_i ——天然气组分 i 的体积分数;

$M_{\text{混}}$ ——天然气的分子量。

若已知天然气中各组分的重量百分数, 则天然气的分子量为

$$M_{\text{混}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{G_i}{m_i}} \quad (1-2)$$

式中 $M_{\text{混}}$ ——天然气分子量;

M_i ——天然气的组分 i 的分子量;

G_i ——天然气的组分 i 的重量分数。

例 1—1 某井天然气的组分如下表, 求天然气的分子量。

组 分	体积百分数 y_i	分子量 m_i	$y_i m_i$
甲烷	0.85	16.00	13.6
乙 烷	0.09	30.10	2.70
丙 烷	0.04	44.10	1.76
正丁烷	0.02	58.1	1.16

解:

$$M_{\text{混}} = 13.6 + 2.7 + 1.76 + 1.16 = 19.23$$

(2) 密度和相对密度

天然气的密度是指单位体积天然气的质量, 用符号 ρ_g 表示, 单位为千克/米³ (kg/m³)。

因为 1mol 气体在标准状态下的体积为 $22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3$, 所以天然气的密度可以用下式求出

$$\rho_g = \frac{M_{\text{混}}}{22.4 \times 10^{-3}} = \frac{\sum m_i y_i}{22.4 \times 10^{-3}} \quad (1-3)$$

由此可知例 1—1 天然气的密度为

$$\rho_g = \frac{\sum m_i y_i}{22.4 \times 10^{-3}} = \frac{19.23 \times 10^{-3}}{22.4 \times 10^{-3}} = 0.86 (\text{kg/m}^3)$$

为了方便, 有时使用相对密度。相对密度是指在标准状态下, 气体密度和空气密度的比值, 是一个无因次量 (用符号 γ_g 表示)。天然气的相对密度, 是指在标准状况下天然气的密度与空气密度的比值。在标准状况下, 空气密度为 1.293kg/m^3 , 那么例 1—1 中天然气的相对密度为

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{空}}} = \frac{0.86}{1.293} = 0.67$$

3. 天然气的状态方程

天然气从地层流到地面。经常要知道地面标准状态下单位体积的天然气在油藏条件下的

体积。要求在地层条件下的天然气体积，离不开天然气的压力、容积和温度这些参数。联系天然气压力、容积与温度的方程称为天然气的状态方程。

(1) 理想气体状态方程

理想气体是认为气体分子间没有作用力，同时分子本身的体积可以忽略，看成质点。在这样的前提下推导出来的气体状态方程称为理想气体状态方程。

根据波义耳、查理和阿弗加德罗等定律可合并推导得出理想气体状态方程为

$$pV = nRT \quad (1-4)$$

式中 p ——气体压力，Pa；

V ——在该压力和温度下的气体体积，L；

T ——绝对温度， $T = t + 273^\circ\text{C}$ ，K；

n ——气体的摩尔数；

R ——气体常数， $R = 8313.71 \text{ Pa/K} \cdot \text{mol}$ 。

(2) 天然气状态方程

天然气是一种真实气体，不能忽略分子本身的体积和分子间的作用力，因此，为了能用理想气体方程来对油田天然气进行计算，就要对方程进行一定的修正，其方法是引进一个叫压缩因子（ Z ）的校正系数（或称偏差系数），它表示真实气体和理想气体的符合程度。

$$pV = ZnRT \quad (1-5)$$

$$Z = \frac{pV}{nRT}$$

显然

$$V_{\text{实}} = Z \frac{nRT}{p} = ZV_{\text{理}}$$

$$Z = \frac{V_{\text{实}}}{V_{\text{理}}}$$

Z 值的物理意义为在相同条件（温度、压力、摩尔数）下，实际气体与理想气体的比值。

当 $Z=1$ 时，即为理想气体。

当 $Z>1$ 时，说明实际气体较理想气体难压缩，气体在高压下的情况。

当 $Z<1$ 时，说明实际气体较理想气体易压缩，气体在低压条件下的情况。

压缩因子 Z 不是一个常数， Z 值大小与气体性质、压力、温度有关。也就是说不同气体有不同的 Z 值，而同一气体，在不同状态下的 Z 值也不同。对各种不同气体的压缩性进行了大量研究，并进行了一定的综合分析，得出 Z 值的变化规律，可直接查表和计算得到这些数值，用于油田的计算。

4. 天然气的体积系数和压缩系数

(1) 体积系数

天然气的体积系数是指在标准状态下， 1m^3 气体在地层温度、压力条件下所占有的体积数。数学表达式为

$$B_g = \frac{V_{\text{地下}}}{V_{\text{地面}}} \quad (1-6)$$

式中 B_g ——天然气体积系数，无因次量；
 $V_{\text{地面}}$ ——标准状况下气体体积， m^3 ；
 $V_{\text{地下}}$ ——地层条件下气体体积， m^3 。

根据气体状态方程

$$p_0 V_{\text{地面}} = Z_0 n R T_0$$

$$V_{\text{地面}} = \frac{Z_0 n R T_0}{p_0} \quad (\text{标准状态})$$

$$p V_{\text{地下}} = Z n R T$$

$$V_{\text{地下}} = \frac{Z n R T}{p} \quad (\text{地下条件})$$

则
$$B_g = \frac{V_{\text{地下}}}{V_{\text{地面}}} = \frac{Z T p_0}{Z_0 T_0 p}$$

若
$$Z_0 = 1, p_0 = 1 \quad (\text{标准状态下})$$

$$B_g = \frac{Z(273+t)}{p \times 273} = 0.00366 \frac{(273+t)Z}{p} \quad (1-7)$$

例 1—2 某气田气体，在地层条件下的压力为 228.5Pa，地层温度为 100.6℃，气体的压缩因子为 0.91 时，气体体积系数为

$$B_g = 0.00366 \frac{373.6 \times 0.91}{228.5} = 0.00545$$

这个体积系数表示在标准状况下 1m^3 的天然气，当它处于地层条件下时，只占有 5.45L 的空间。在实际工作中也采用体积系数的倒数。 $1/B_g$ 来进行运算，用 B_g 代表 $1/B_g$ 。 B_g' 可以理解为在地层条件下 1m^3 的天然气到了地面标准状况下的体积 (m^3) 数。

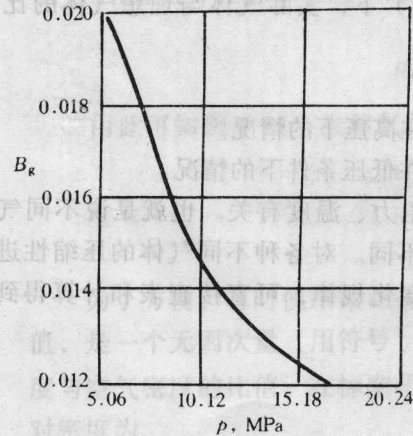


图 1—1 体积系数和压力关系曲线的一般形式

在实际的油气层中，由于地层温度保持不变，而地层压力不断变化，因此 B_g 可以看作地层压力的函数，即可写成 $B_g = C \frac{Z}{p}$ (C 为比例系数)。在不同地层条件下，可作出 $B_g - p$ 的关系曲线。如图 1—1 所示。

此曲线在储量计算时，使用起来很方便，可直接查曲线求出 B_g 值。

(2) 压缩系数

天然气的压缩系数是反映在等温条件下，单纯由于压力的变化而引起的天然气的体积变化率。其定义为：每改变一个单位压力时气体体积的变化率，其数学表达式为

$$C_g = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-8)$$

式中 C_g ——天然气的压缩系数, $1/\text{MPa}$;

ΔV ——天然气的体积改变量, m^3 ;

Δp ——天然气的压力改变量, MPa 。

负号说明气体压缩系数与压力变化方向相反。

天然气的压缩系数广泛应用于气驱油的有关运算中。在实际工作中, 天然气的压缩系数一般由高压物理实验方法确定。

二、地层油的高压物理性质

在地层条件下的原油处于高温和高压的情况下, 溶解了大量天然气, 因此, 如油的密度、粘度、体积系数等都与地面油有很大的差异。在开发过程中, 由于油层压力的变化, 天然气从溶解状态转变为分离状态, 所以有必要了解其变化规律和影响因素。

1. 地层烃类的相态

地层烃类指的是油层中的全部有机质, 包括天然气、原油和蜡。在地层高温高压的条件下, 当气体完全溶于石油时, 地层烃类处于单一的液体状态。而当地下气体数量较多或油层压力不高, 以及气体不能全部溶于石油时, 油层就有部分游离气出现, 这时油层处于油、气两相状态。如果气体数量极大, 而油量少, 油质轻, 地层压力又高, 则油可溶于天然气中成为单一的气体存在, 这种气田叫凝析气田。

地层烃类相态与温度、压力及组成的关系, 可用相态图表示。

(1) 单组分体系的相图

先看单组分的相态: 把一个单一组分的烃置入密闭容器中, 由于液体的蒸发和蒸汽的凝结, 若在同一时间内, 离开液体的分子数和回到液体的分子数相等, 则液体与它的蒸汽所产生的压力称为饱和蒸汽压。液气两相的动态平衡是有条件的, 温度改变, 旧的平衡被新的平衡所代替, 呈现出新的饱和蒸汽压。对某一纯液体, 其饱和蒸汽压力与温度的关系曲线为该液体蒸汽压曲线。如图 1-2 所示。曲线上方为液相, 下方为气相, 曲线上各点代表相应温度下, 液气两相处于平衡状态时的蒸汽压力值, C 点是临界点。

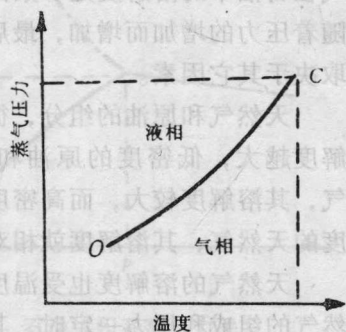


图 1-2 单组分压力温度图

(2) 多组分体系的相图

油藏和气藏由大量单组分组成。图 1-3 是典型的多组分烃类化合物油藏流体的相态图。由图中曲线可知:

- 1) 某一多组分系统, 当压力和温度条件不同时, 可以以液相、气相两相共存的方式存在。
- 2) $ACPTB$ 线, 勾画出该多组分系统可能以两相共存的压力和温度范围。
- 3) AC 线称泡点线, 泡点线就是当压力一定时, 液体中出现第一批气泡的温度。泡点线就是不同温度下的饱和压力线。当压力降到该点时, 体系出现第一批气泡。
- 4) CB 线称为露点线。露点就是当压力一定时, 气体中凝结出的第一批液滴的温度, 露点线是单一气相开始以露滴形成析液的界线。
- 5) 在 CPT 线附近局部范围内有一反转凝析区 X , 在正常情况下, 压力降低, 液体蒸发。反转即与正常相反, 降低压力反而有液相析出。
- 6) 烃类系统处于 AC 泡点以上, 如 1 点的压力温度下, 则为未饱和油藏; 在 T 点的温

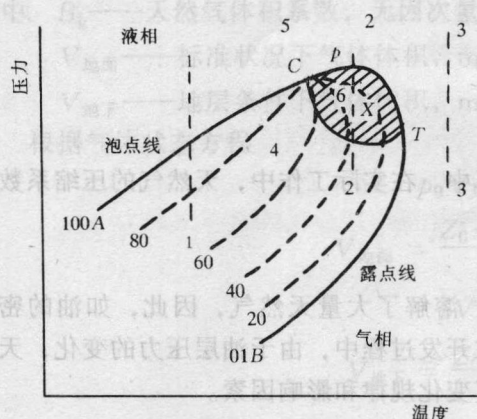


图 1-3 多组分烃类典型相态图

C—临界点；1—未饱和油藏；2—凝析油气藏；
3—气藏；4—有气顶油藏；5—轻质易挥发油藏；
6—带有反转凝析气顶油藏；T—临界凝析温度；
p—临界凝析压力；X—反转凝析压

度下，则为未饱和油藏；在 T 点的温度以上或 TB 露点线以下范围，则为纯天然气藏。如处于 2 点的情况下，则为凝析油气藏。如处于两相区内的 4 点的条件下，因液气共存，则成为带气顶的饱和油藏。在点 6 的条件下则成为凝析气顶油藏。在点 5 的情况下，则成为易挥发油藏。

2. 原油中气体的溶解和分离

(1) 溶解

溶解气体在石油中的溶解能力，可用溶解度来表示。即一定压力下单位体积原油中溶解的气量（标准状态下）称为天然气在原油中的溶解度，其单位是 m^3/m^3 ，天然气在原油中的溶解能力的大小，取决于温度、压力、天然气和原油的成分。

按照亨利定律，当温度一定时，单组分气体在液体中的溶解度与溶解时的绝对压力成正比，

这是一个直线定律。而对于多组分结构相近的烃类气体，则有较大的偏差。实验表明：天然气在石油中的溶解度是一条凸向压力轴的曲线。如图 1-4 所示。天然气在石油中的溶解度随着压力的增加而增加，最后可保持不变。这是因为天然气的溶解度，不仅取决于压力，还取决于其它因素。

天然气和原油的组分，彼此越接近则溶解度越大，低密度的原油和高密度的天然气，其溶解度较大，而高密度的原油和低密度的天然气，其溶解度就相对小一些。

天然气的溶解度也受温度的影响，当天然气的组成和压力一定时，其溶解度随温度的增加而有所减小。但减小的程度又与压力有关。低压时，溶解度随温度增高而减小的程度较小；高压时，溶解度随温度的增高而减小的程度较大。

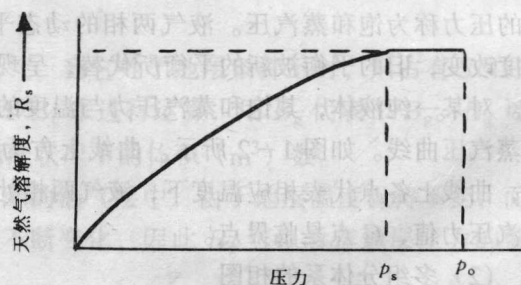


图 1-4 天然气在石油中溶解度随压力变化曲线

(2) 分离

随着石油的开采，地层压力将不断下降，当地层压力降至一定值时，溶解在原油中的气体，开始从原油中分离出来。我们常把从原油中分离出来第一批气泡时的压力称为油田的饱和压力。天然气与石油的溶解和分离，是事物的两个方面，是相反的两个过程。譬如油气组成对溶解有影响，对分离也有影响。一般容易溶解于石油中的气体组分，它从石油中分离出来也就越困难；反之，难于溶解的气体组分就容易从原油中分离出来。气体分离还与脱气方式有关，脱气方式可分为两种类型：接触脱气和差异脱气。

接触脱气指在脱气过程中，将压力一次降低至某一压力值时，并测量分离出来的气量。在整个脱气过程中，分离出来的气体并不引出容器，在一定时期总是同石油接触的，油气系统总的组成不变，相当于实验室的一次脱气，因而接触脱气也叫一次脱气。

差异脱气指在脱气过程中，不断地将分离出来的气体排出容器，直到压力降低到指定压力为止，最后计算出总的脱气量。在这一过程中，由于分离出来的气体立即排出，油气总的组成是不断变化的，这种脱气方式也叫微分脱气和次级脱气。

通常一次脱气比次级脱气分离出来的气体要多。油田的实际开发过程就是两种脱气方式的混合过程。

三、地层油的体积系数

地层石油以饱和压力为界，分单相石油体积系数和两相石油体积系数。

单相石油体积系数是指地层压力高于或等于饱和压力时，地层石油的体积与地面脱气石油的体积之比值。其数学表达式为

$$B_o = \frac{V_o}{V_{os}} \quad (1-9)$$

式中 B_o ——地层单相石油体积系数，以小数表示；

V_o ——地层单相石油体积， m^3 ；

V_{os} ——同一石油在地面脱气后的体积， m^3 。

地层石油的体积系数主要与溶解气量的多少有关，另外与压力，温度和脱气方式有关。如图 1-5 所示。当压力小于饱和压力时，随着压力的增加，溶解于石油的气量也增加，故地层石油的体积系数随着压力的增高而增大。当压力等于饱和压力时，溶解于石油中的天然气量最多，这时地层石油的体积系数最大。当压力大于饱和压力时，随着压力的增加石油受到压缩，因而地下石油的体积系数随着压力的增加而减小。

由于地层油溶有大量的天然气，而且地下温度都较高，因为这两者对体积系数的影响远远超过压力对体积系数的影响，故地层石油的体积系数一般都大于 1，常处在 1.08~1.6 之间，个别大于 2。

体积系数可用高压物性测定仪直接测定，也可用图表的方法进行计算。

当油层压力低于饱和压力时，地层油的地下体积和析出气体的地下体积之和，与它在地面脱气原油体积的比值定义为地层油的两相体积系数。

四、地层油的压缩系数

由于地层石油溶有大量的天然气，使得地层石油比地面脱气石油具有更大的弹性。地层油的弹性大小通常用压缩系数来表示。它的含义是单位体积的地层石油在改变一个单位压力时的体积变化率。

$$C_o = -\frac{1}{V_o} \cdot \frac{\Delta V_o}{\Delta p} \quad (1-10)$$

式中 C_o ——地层石油的压缩系数， $1/MPa$ ；

V_o ——原始地层压力时的石油体积， m^3 ；

Δp ——原始地层压力与石油饱和压力之差， MPa ；

ΔV ——在原始地层压力与石油饱和压力时的石油体积之差， m^3 。

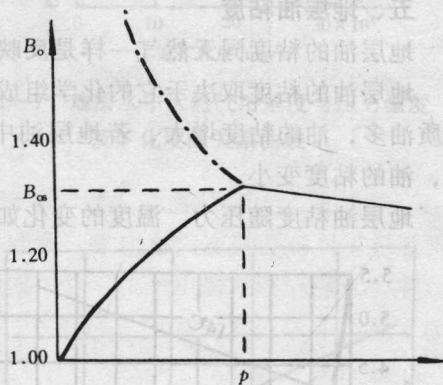


图 1-5 石油体积系数压力关系

公式中负号表示压力变化与体积变化相反。地层油的压缩系数主要决定于天然气和石油的组成,溶解气量以及压力和温度的条件。如果地层压力和温度愈高,石油轻组分愈多,则石油的压缩系数愈大。从表 1-1 可以看出,地层油的压缩系数和地层油中天然气的溶解度有密切关系,其溶解度大,压缩系数也大。在不同的压力区间,地层油的压缩系数是不一样的。天然气、石油和储油岩的压缩性,构成了油藏的弹性能量,当地层压力高于饱和压力时,就是靠这一部分能量采出地层中的石油。

表 1-1 某些油田原油物性参数

油田名称	气油比, m ³ /m ³	体积系数	原油压缩系数, 1/MPa
大庆油田 K 层	48.2	1.129	7.7×10^{-4}
孤岛油田渤 26-18 井 G 层	27.5	1.095	7.3×10^{-4}
玉门油田 L 层	65.8	1.157	9.6×10^{-4}
大港油田西一区 44 井 M 层	37.3	1.09	7.3×10^{-4}

五、地层油粘度

地层油的粘度同天然气一样是反映流体在流动过程中内部的摩擦阻力。

地层油的粘度取决于它的化学组成、溶解气含量以及温度和压力。地层油的组成中,含重质油多,油的粘度增大,若地层油中溶解了大量的天然气,气体分子间的引力要比液体小,油的粘度变小。

地层油粘度随压力、温度的变化如图 1-6 所示。

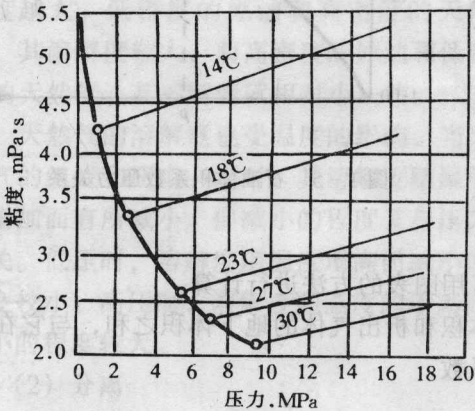


图 1-6 原油粘度与压力、温度关系

在温度一定的条件下,当压力低于饱和压力时,压力增加使油中溶解气量增加,地层油粘度下降;当压力高于饱和压力时,压力增大,使石油密度增大,液层内部摩擦力增大,因而粘度增大。

地层油受温度影响要明显得多,温度增加,液体分子运动的速度增大,液体分子引力减小,因而粘度降低。

六、油层水的高压物理性质

油层水是地下水的一部分,有时同油气藏组成一个统一的水动力系统。油层水按产水的状态分底水、边水和层间水;按水的状态可分为

束缚水和自由水。由于石油的运移、聚集以及油气的开采,都是在油层水存在下发生的,因此研究油层水的高压物理性质,对油气开发具有重要意义。

在油层的条件下,由于油层水中含有大量的金属盐类和少量的天然气,这就使油层水和地层油的高压物性有所不同。

1. 天然气在油层水中的溶解度

天然气在油层水中的溶解度是很低的,如图 1-7 所示。一般在 10MPa 压力下,所溶解的天然气量也只有 1~2m³/m³。

天然气在纯水中的溶解能力,主要决定于压力,随压力增加而增加。而温度影响较小,

一般随温度增加而降低。与油层水中矿化度的关系，是随矿化度的增加而减少。由于矿化度的影响，在使用图版计算溶解气量时，必须对矿化度的影响进行校正。

2. 油层水的压缩系数

油层水的压缩系数同石油一样可定义为单位体积油层水在改变单位压力时体积的变化率。其数学表达式为

$$C_w = -\frac{1}{V_w} \cdot \frac{\Delta V_w}{\Delta p} \quad (1-11)$$

式中 C_w ——油层水的压缩系数，1/MPa；
 V_w ——某温度下油层体积， m^3 ；
 Δp ——在某温度下压力的变化，MPa；
 ΔV_w ——在压力变化 Δp 时的体积变化值， m^3 。

负号表示体积变化同压力变化成反比。

油层水压缩系数同样受压力、温度和溶解其中的天然气的影响。因而在实际应用时，先

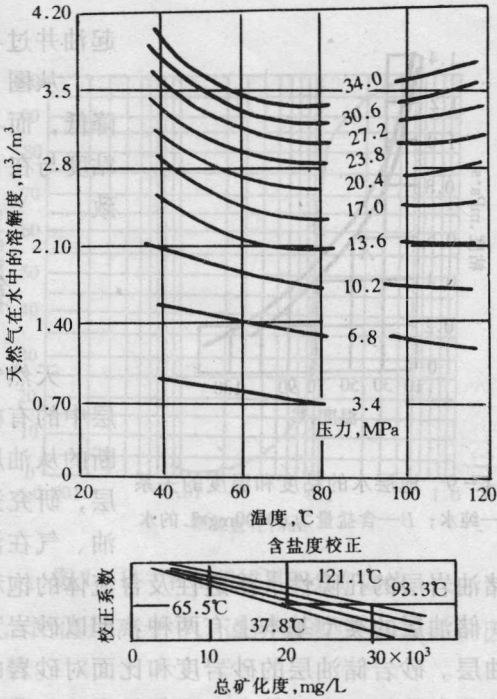


图 1-7 地层水中天然气溶解度与压力温度及矿化度的关系曲线

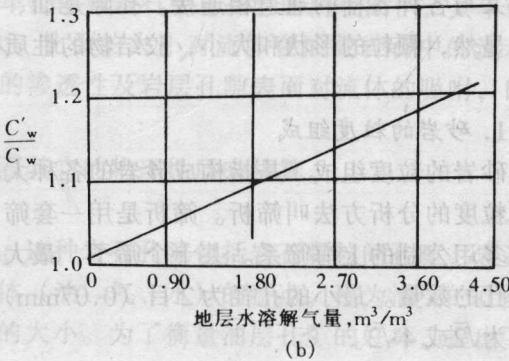
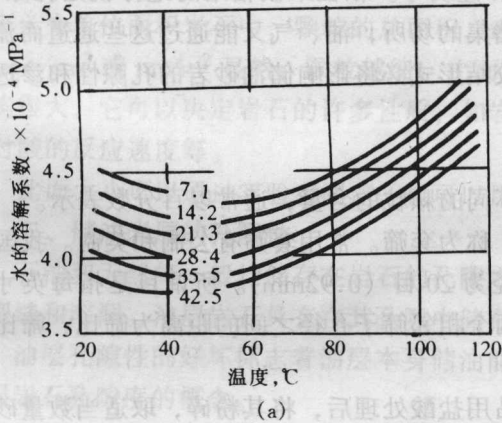


图 1-8 油层水压缩系数

确定无溶解气时油层水的压缩系数，如图 1-8 (a)，然后再根据图 1-8 (b) 进行溶解气校正。

3. 油层水的体积系数

油层水的体积系数 B_w 与地层油的定义相同，同样受温度、压力、溶解气量的影响，由于溶解气量很小，影响的程度比地层油小得多，因此在一般计算上可忽略不计。

4. 油层水的粘度

油层水粘度的定义与地层油和天然气的定义一样。油层水的粘度主要受温度的影响，而与地层压力关系不大。

当研究油水在地层中流动时，油水粘度比是一个重要的参数。因为油水粘度比大，会引

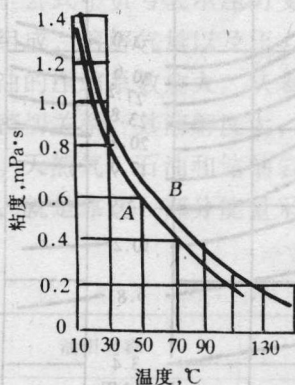


图 1-9 地层水的粘度和温度的关系
A—纯水；B—含盐量为 60000mg/L 的水

起油井过早含水生产，致使含水上升过快。

从图 1-9 中可看出：油层水粘度随温度增高而急剧降低，而与压力几乎没有关系。例如在 50.0MPa 时水的粘度与在 0.1MPa 时水的粘度和温度的关系曲线几乎一致。

第二节 储油岩层的物理性质

天然气和石油是深埋在地下有孔隙、裂缝和溶洞等岩层中的有机物，一旦把油层打开，油、气和水就会源源不断的从油层中流到地面。为了开发好油田，就必须认识油层，研究这些多孔岩石的特性，尤其是渗流特性，它对油、气在油层中的流动影响最大。所谓渗流特性，主要是

指储油岩层的孔隙性、渗透性及含流体的饱和性。

储油层的类型基本上有两种：即以砂岩为主的孔隙性储油层和以碳酸盐岩为主的裂隙性储油层。砂岩储油层的砂岩度和比面对砂岩的物性影响很大；碳酸盐岩的孔隙类型又决定了它的分布特征和含油特点。这都是在这一节要学习的主要内容。

一、砂岩的粒度和比面

砂岩是由性质不同、形状各异、大小不等的颗粒经胶结物粘结而成的。砂岩颗粒大小约为 0.1~0.01mm，胶结物多为泥质、灰质、铁质和硅质等。颗粒未被粘结的地方就是孔隙，孔隙又与各种各样的通道相连接。孔隙是油、气储集的场所，油、气又能通过这些通道而流动。显然，颗粒的形状和大小，胶结物的性质和胶结形式必将影响储油砂岩的孔隙性和渗透性。

1. 砂岩的粒度组成

砂岩的粒度组成，是指构成砂岩的各种大小不同的颗粒的含量，通常以百分数表示。

粒度的分析方法叫筛析。筛析是用一套筛子，称为套筛。常用套筛有公制和英制。我国一般多用公制的上海筛系。共十个筛子，最大孔径为 20 目 (0.92mm)。所谓目是指每英寸所含孔的数量。最小的孔径为 2 目 (0.07mm)，两个相邻筛子孔径之间的距离为筛比，筛比一般为 $\sqrt{2}$ 或 $4\sqrt{2}$ 。

用筛析的方法进行分析实验时，先将砂岩样品用盐酸处理后，将其粉碎，取适当数量砂子放在筛子上，用振筛机振荡，使砂子通过筛子，然后在天平上称量每个筛子筛上砂子的重量。

根据实验数据，绘制粒度组成分布曲线和粒度组成累积分布曲线。如图 1-10 和图 1-11 所示。

由图 1-10 可以清楚地看出各种直径颗粒所占的百分数。其中某一矩形越高，表明该砂岩粒度组成越均匀。在实际工作中累积分布曲线使用的更多些。由图 1-11 可以看出：累积曲线越陡，粒度组成越均匀；反之，累积曲线越平，则表明粒度组成越不均匀。

粒度中值 Md 是指在粒度累积曲线上累积产率为 50% 所对应的颗粒直径的尺寸。粒度中值 Md 反映了岩石颗粒粒度的大小，大体上是岩石的颗粒平均直径。

分选系数 S_0 指在粒度累积曲线上累积粒度为 30% 和 80% 时相对应的颗粒直径的比值。

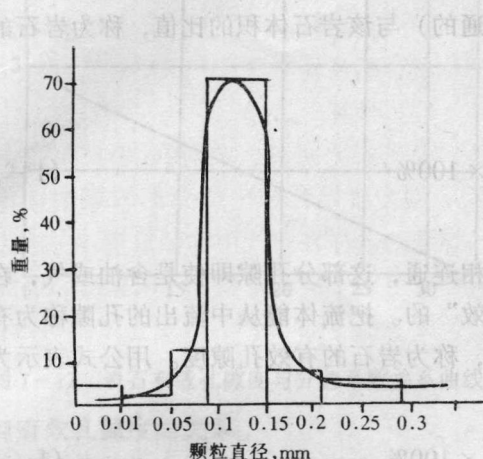


图 1-10 粒度组成分布曲线

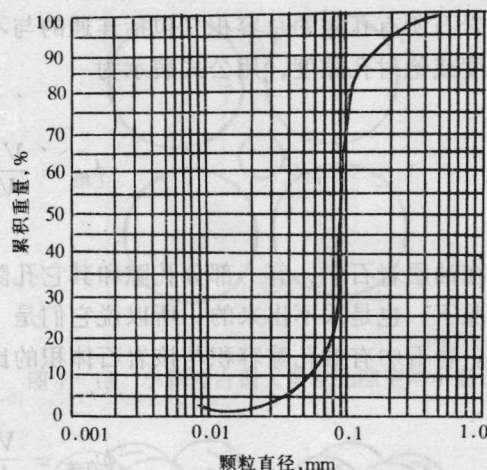


图 1-11 粒度组成累积分布曲线

当 S_0 接近于 1 时, 说明颗粒均匀, 分选好; 反之, 比值远离于 1, 说明颗粒大小不一。因此分选系数是反映岩石颗粒组成均匀程度的一个参数。

砂岩的胶结类型, 由于已在矿物岩石学课程上作过介绍, 这里就不再赘述。对油气的储集和流动来说, 一般认为, 接触胶结优于孔隙胶结, 孔隙胶结优于基底胶结。

2. 砂岩的比面

粒度组成是表示砂岩分散程度的指标。同样, 砂岩分散程度可以用比面大小来表示。比面定义为单位面积岩石中, 颗粒的总面积, 或者单位体积岩石中总孔隙的内表面积, 其单位是 cm^2/cm^2 或 m^2/m^2 。显然, 颗粒越细, 比面越大。比面的大小对流体在油藏岩石中的流动影响很大, 它可以决定岩石的许多性质, 如岩石的渗透性及岩层孔隙表面对流体的吸附, 以及对酸的反应速度等。

比面大小可以通过实验室测定, 也可以用岩石其它的物理性质来估算。

二、储油岩层的孔隙性

石油和天然气一般均储存在岩石的孔隙之中。这种岩石孔隙包括岩石颗粒间孔隙、岩石的裂缝和溶洞。油层岩石具有在其孔隙中储存流体(油、气、水)的特点, 称为油层的孔隙性。油层孔隙性的好坏标志着油层本身储油能力的大小。为了衡量油层孔隙的好坏, 提出了油层岩石孔隙度的概念。

1. 岩石孔隙度的概念

岩石的孔隙度是指岩石中孔隙的容积与该岩石体积的比值。

$$\text{岩石的孔隙} = \frac{\text{岩石孔隙容积}}{\text{岩石体积}}$$

岩石孔隙度可以写作百分数或小数。

如以 ϕ 表示岩石孔隙度, $V_{\text{总}}$ 表示岩石体积, 则岩石孔隙度用百分数表示为

$$\phi = \frac{V_{\text{空}}}{V_{\text{总}}} \times 100\% \quad (1-12)$$