



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

石油工程概论

陈涛平 吴晓东 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校石油天然气类规划教材

石油工程概论

陈涛平 吴晓东 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是为非石油工程专业学生编写的教材。全书共分为10章,重点介绍了石油工程领域的基本概念、基本原理和广泛应用的工艺技术,内容主要包括油气藏、流体物性及流体在地层中的渗流规律、油田开发设计与动态分析、油气田钻井、固井与完井、采油方法、油水井增产增注措施、提高采收率技术、油气层保护、油气集输等。

本书除可作为非石油工程专业学生的教材外,亦可供油田有关工程技术人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程概论/陈涛平,吴晓东编著.

北京:石油工业出版社,2006.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-5021-5646-1

I. 石…

II. ①陈…②吴…

III. 石油工程—高等学校—教材

IV. TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 088228 号

石油工程概论

陈涛平 吴晓东 编著

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)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:9.25

字数:228千字 印数:1—3000册

定价:15.00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

进入 21 世纪以来,国内石油院校相继为校内非石油工程专业学生开设了石油工程概论选修课。应教学需求,大庆石油学院于 2000 年编写了校内试用教材《石油工程概论》,中国石油大学(北京)于 2001 年编写了校内试用教材《采油工程概论》,并在各自校内试用。根据两校校内试用教材的使用情况,听取两校任课教师和学生的意见及建议,2005 年 5 月在石油工业出版社的组织下,《石油工程概论》教材由中国石油大学(北京)和大庆石油学院联合编写,并被石油高等院校教材建设委员会选定为高等院校石油天然气类规划教材进行建设。2005 年 6 月由陈涛平、吴晓东审定了编写大纲并重新开始编写。2006 年 8 月《石油工程概论》被正式批准为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

在《石油工程概论》的编写过程中,按照生产系统工艺过程及由浅入深、循序渐进的认识规律,将石油天然气工程领域中的知识有机地融合起来,正确反映了石油天然气工程一级学科的知识全貌,具有较强的系统性、完整性。全书坚持简明扼要、通俗易懂的原则,重点介绍了石油工程领域的基本概念、基本原理和广泛应用的工艺技术,以便使非石油工程专业学生或工程技术人员通过学习本教材,能够掌握石油工程领域的基本知识、拓宽知识面,从而顺利地完成了石油天然气工程有关的工程技术、工程管理和科学研究任务。针对石油工程概论课程实践性强,而非石油工程专业学生对石油工程领域缺乏感性认识的实际情况,教材中给出了大量的篇幅,以增加学生对石油工程领域的感性认识,便于自学。

本教材第二章、第五章、第六章初稿由吴晓东、陈涛平编写,其它章节初稿由陈涛平、王江编写。全书由陈涛平统稿,由吴晓东审阅。

在本教材的编写过程中,得到了中国石油大学(北京)石油天然气工程学院和大庆石油学院石油工程学院许多老师的帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误之处在所难免,诚恳欢迎使用本教材的师生和广大读者给予批评指正。

编 者
2006 年 8 月

目 录

第一章 油气藏及流体物理性质	1
第一节 石油的生成及油气藏的形成.....	1
第二节 储集层岩石的物理性质.....	2
第三节 油藏流体的物理性质.....	6
第四节 流体在地层中的渗流规律	10
第二章 油田开发设计	14
第一节 开发方案设计概述	14
第二节 油田的合理开发程序	23
第三章 油气田钻井	25
第一节 钻井设备	25
第二节 钻井液	28
第三节 井眼轨道控制	30
第四节 最优化钻井技术	34
第四章 固井与完井	36
第一节 固 井	36
第二节 完 井	38
第三节 试 油	42
第五章 采油方法	44
第一节 自喷采油	44
第二节 有杆泵采油	50
第三节 潜油电泵采油	55
第四节 螺杆泵采油	57
第五节 水力活塞泵采油	60
第六节 水力射流泵采油	62
第七节 气举采油	63
第八节 排水采气	65
第六章 油水井增产增注措施	68
第一节 水力压裂	68
第二节 酸 化	73
第三节 高能气体压裂	75
第四节 物理法增产增注技术	77
第五节 调剖堵水	82
第六节 油井防砂与清砂	83
第七节 油井防蜡与清蜡	85

第七章 提高原油采收率	88
第一节 影响原油采收率的因素	88
第二节 提高原油采收率的方法	89
第八章 油气层损害及保护	100
第一节 油气层损害机理	100
第二节 油气层损害的评价方法	103
第三节 油气层保护	104
第九章 油田开发动态分析及开发调整	108
第一节 经验方法	108
第二节 物质平衡方法	111
第三节 数值模拟方法	116
第四节 油田开发调整	118
第十章 油气集输	121
第一节 油气集输流程	121
第二节 油气分离和原油稳定	127
第三节 原油脱水	131
第四节 天然气净化和轻烃回收	134
第五节 含油污水处理	137
参考文献	140

第一章 油气藏及流体物理性质

石油工程的主要任务是将储存在地下岩石孔隙中的石油和天然气开采出来。储油岩石及岩石内流体的物理性质不仅直接影响着油气的储量和产量,而且对整个油气藏的开采过程起着主要的控制作用,因此,掌握油气藏及其流体物理性质是顺利完成石油工程各项任务的基础。

第一节 石油的生成及油气藏的形成

石油是怎样生成的呢?这是地质学家长期争论的一个问题。从18世纪70年代至今,地质学家对石油的生成问题先后提出了不下十种学说,按照生成石油物质的化学性质,可以把这些学说归纳为两种:石油无机生成说和石油有机生成说。

石油无机生成说认为,石油是在地壳深处高温高压下,由无机碳和氢经过化学作用而形成的。无机生成说在19世纪以前曾经风靡一时,进入20世纪以后,遭到大多数地质学家的反对,有机生成说渐渐地占了优势。

石油有机生成说认为,石油是由沉积岩中的有机物质生成的,也就是说石油是由动物和植物的尸体,尤其是以低等微生物为主的尸体,在适当的地质环境条件下经过复杂的转化过程而形成的。

丰富的有机物质是生成油气的物质基础。但有机物质能否变成石油和天然气,还需要有适当的外界环境条件,即必须具备还原条件,使有机物质得以埋藏和保存。在地质历史当中,生油过程多发生在古代曾经是浅海、海湾、潟湖或大陆上的湖泊等地区。这些地区阳光充足、温度适宜,良好的温暖、潮湿气候便于各种生物大量滋生和繁殖,并在死亡后有可能就地沉积在水底;另外,这些水域地区的周围常常发育着许多河流,也有可能通过这些河流将附近或远处大量的陆生或水生生物的尸体连同泥沙和其它矿物质一起冲来沉积在水底。大量陆生的有机物质同泥沙和其它矿物质一起,在低洼的浅海或湖泊中沉积下来形成淤泥,称为有机淤泥,这是生油的原始材料。有机淤泥形成后又被新的沉积物迅速地覆盖埋藏起来,形成了与空气隔绝的还原环境,从而使其中有机物质不可能腐烂成气体而散失。

这些低洼区随着地壳的运动,边沉降、边沉积,沉积物越积越厚。在漫长的地质历史期间,生油过程逐步地向更高级发展,使长期处于封闭还原环境条件下的极其丰富的有机物质保存下来。随着有机淤泥埋藏深度的增加,它所承受的上覆沉积物的压力越来越大,温度越来越高。同时,在压力、热力、催化剂和微生物等作用下,处在还原环境中的有机物质经过一个漫长的“去氧、加氢、富集碳”的地质过程才形成了分散的石油。这个漫长而又复杂的转化过程,往往要经历数百万年。

石油有机生成说发展到今天,已经能够较圆满地解释目前所发现的油田及其分布,因而已被广泛地应用于指导油田的勘探工作。

石油开始生成的时候,是非常细小的油滴,呈分散状态分布在沉积岩层中。要形成工业上有开采价值的油田,必须把这些分散的油滴进一步聚集起来,同时还必须有适当的条件,使石油能够保存下来而不至于流失,这不仅需要有生油层和储油层,还需要有适当的地质构造和盖

层。生油层、储油层和保护油气不至流失的盖层是形成油气藏必需的地质因素，三者缺一不可。

生油层就是生成石油的岩层，它是自然界中石油和天然气生成的实际场所，是生油物质与生油环境的具体体现。生油层通常是泥岩或石灰岩。生油层一般都是致密的，不可能储存大量的石油。在地层的静压力和毛管压力作用下，生油层中的石油沿着微细的裂缝孔道逐渐向有孔隙的岩层运移，最后聚集在有孔隙的岩层中，这种有足够孔隙、可以聚集石油并且石油可在其中流动的岩层，就叫储油层。砂岩和碳酸盐岩富于孔隙和裂缝，被认为是理想的储油层。盖层是位于储油层上面渗透性极低的不渗透岩层，常见的有泥岩、页岩、盐岩及致密的石灰岩和白云岩等。

石油运移到储油层以后，还不一定能形成油气藏，只有在运移的道路上遇到遮挡，不能继续前进时，才能聚集起来，形成油气藏。这种由于遮挡而造成的适于石油聚集的场所，通常称为圈闭。圈闭的存在是形成油气藏最重要的前提条件之一。当有足够的石油进入圈闭时，就会形成油气藏。在圈闭中只聚集液体石油的称为油藏，只聚集天然气的称为气藏，同时聚集液体石油和天然气的则称为油气藏。因此，圈闭实质上就是指促成油气聚集的封闭形式。

油气藏是油气聚集的基本单元。若油气聚集的数量足够大，具有开采价值，则称为工业油气藏；如果油气聚集的数量不够大，没有开采价值，就称为非工业性油气藏。

由单一构造控制下的同一面积范围内的一组油藏的组称称之为油田。显然，油藏和油田是不同的两个概念。一个油田可以是一个油藏，也可包含几个乃至几十个油藏，前者称为单一型油田，后者称为复合型油田。根据油气储集层的岩性，可以将油气藏分为砂岩油气藏和灰岩油气藏；根据油气藏的规模和发育状况，可以将油气藏分为整装油气藏和断块油气藏。

第二节 储集层岩石的物理性质

油气储集层的性质与储存油气的岩石有着密切的关系。岩石的种类很多，并不是所有的岩石都能成为油气储集层。能够成为油气储集层的岩石须具备两个条件：一是要有孔隙、裂缝或空洞等，让油气有储存的空间；二是孔隙之间、裂缝之间或空洞之间能够互相连通，构成油气流动的通道。目前，世界上常见的油气层种类很多，主要有砂岩油层、砾岩油层、泥岩裂缝油层、碳酸盐岩油层、火山岩油层等，像我国大庆油田、胜利油田、辽河油田都是砂岩油层，任丘油田、四川气田都是碳酸盐岩油气层，克拉玛依油田是以砾岩油层为主的油层。油气层的类型很多，本节着重介绍砂岩的物理性质，诸如孔隙度、渗透率和岩石中油水饱和度等。油层的孔隙度、渗透率、饱和度特性是认识油层储油状况、划分主力油层、确定有效厚度、估算储量及分析油田生产状况的基础，是油田勘探开发依据的最基本的岩石物性参数。

一、储集层岩石的孔隙度及压缩系数

砂岩是性质不同、形状各异、大小不等的砂子颗粒经地质胶结而成，颗粒与颗粒之间未被胶结物充填的地方构成了孔隙。石油和天然气等储集层流体正是储存在岩石孔隙中，故孔隙的大小、形状、连通方式直接影响油气储量及油气运移过程。同时，储集层岩石及孔隙中储存的流体具有一定的压缩性和弹性，其弹性能量的大小对油田开发是十分重要的。

(一) 岩石的孔隙度

岩石的孔隙度 ϕ 是指岩石的绝对孔隙体积 V_p 与岩石的表观体积 V_f 的比值，即

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \times 100\% \quad (1-1)$$

岩石的表观体积是岩石总的体积,包括岩石骨架体积和岩石孔隙体积。岩石的孔隙体积是指岩石内部孔洞和裂缝的体积。式(1-1)求得的孔隙度为绝对孔隙度。若用岩石的有效孔隙体积 V_e 代替岩石的绝对孔隙体积 V_p ,则得到岩石的有效孔隙度 ϕ_e 。岩石的有效孔隙体积是指相互连通的孔隙体积。

孔隙度是计算油气储量和评价油气藏的一个重要指标,通常用的是有效孔隙度。砂岩的孔隙度一般在 10%~25% 之间,详见表 1-1。

表 1-1 储集层岩石孔隙度与物性

孔隙度, %	5~10	10~15	15~20	20~25
物性	差	一般	好	特好

储集层岩石的孔隙可以根据其大小及在渗流中所起作用的不同,分为三类。

(1) 超毛管孔隙

孔隙直径大于 500 μm , 该孔隙中流体在重力作用下可自由流动。

(2) 毛管孔隙

孔隙直径介于 0.2~500 μm 之间, 或裂缝宽度介于 0.1~250 μm 之间, 只有当外力大于毛细管力时, 其中流体才可流动。

(3) 微毛管孔隙

孔隙直径小于 0.2 μm 或裂缝宽度小于 0.1 μm , 在通常条件下, 流体在其中不能流动。

(二) 岩石的压缩系数

在油田开发之前, 上覆岩柱压力(外压)和油层内的流体压力(内压)及油层岩石骨架所承受的压力(外压与内压的差值)处于平衡状态。油田开发以后, 油层内流体的压力降低, 平衡遭到破坏, 在外压与内压的压差加大的情况下岩石砂粒变形, 从而使孔隙体积缩小, 如图 1-1 所示, 这有利于把油挤入油井内。

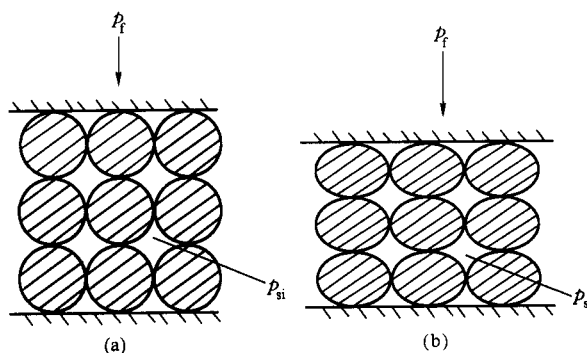


图 1-1 油藏压力减小后储集层骨架变形示意图

(a) 原始油藏压力 p_s 平衡岩柱压力 p_t ; (b) 油藏压力 $p_s < p_t$ 使平衡被破坏

岩石受压缩使孔隙体积减小的数值, 常用岩石的压缩系数 C_t 来表示

$$C_t = -\frac{dV_p}{V_t} \frac{1}{dp} \quad (1-2)$$

式中 dV_p ——油层压力降低 dp 时,孔隙体积的缩小值;
 V_i ——岩石的表观体积。

岩石压缩系数实质是指油层压力每降低单位值时,单位体积岩石内孔隙体积的变化量。岩石压缩系数一般为 $(1\sim 2)\times 10^{-4}\text{MPa}^{-1}$,它反映了油层岩石弹性驱油能量的大小。

整个油层弹性能量(包括岩石骨架和储集层流体)的大小通常用综合弹性压缩系数 C 表示

$$C = \phi C_1 + C_f \quad (1-3)$$

式中 C_1 ——流体的压缩系数,一般取 $4.5\times 10^{-4}\text{MPa}^{-1}$;
 C_f ——岩石的压缩系数。

二、储集层岩石的渗透率

油层砂岩中多数孔隙是相互连通的,因此,在一定的压差下,它具有让流体(油、气、水)通过的能力,即渗透性。渗透性的好坏用渗透率表示,它反映了储集层岩石允许流体通过的能力。

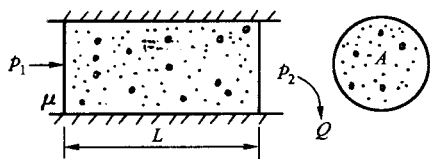


图 1-2 达西渗滤试验示意图

1856年,法国水利工程师达西(Darcy)通过水渗滤非胶结砂岩模型试验,如图 1-2 所示,得出了通过岩心的流量与岩心截面积及压差成正比,与流体黏度和岩心长度成反比的结论。此即著名的达西定律,用数学表达式表示为

$$q = K \frac{A \Delta p}{\mu L} \quad (1-4)$$

式中 K ——岩石的渗透率, m^2 ;
 q ——流量, m^3/s ;
 μ ——流体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;
 L ——岩心长度, m ;
 A ——岩心截面积, m^2 ;
 Δp ——岩心两端的压差, Pa 。

式(1-4)也可改写成

$$K = \frac{q\mu L}{A \Delta p} \quad (1-5)$$

由于 m^2 这个渗透率单位太大,应用起来不方便,石油工业中常用 μm^2 来表示渗透率。它们之间的关系为

$$1 \mu\text{m}^2 = 10^{-12} \text{m}^2$$

例 1-1 有一块砂岩岩心,长度为 3cm ,截面积为 2cm^2 ,其中只有水通过(百分之百含水)。水的黏度为 $1 \text{mPa}\cdot\text{s}$,在压差 0.2MPa 下通过岩心的流量为 $0.5 \text{cm}^3/\text{s}$,求砂岩的渗透率。

解 根据式(1-5)可得

$$\begin{aligned} K &= \frac{q\mu L}{A \Delta p} \\ &= \frac{0.5 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-4} \times 0.2 \times 10^6} \\ &= 0.375 \times 10^{-12} \text{m}^2 \\ &= 0.375 \mu\text{m}^2 \end{aligned}$$

用原油代替水重复上述试验,发现用原油测得的岩石渗透率也是 $0.375 \mu\text{m}^2$,说明岩石的渗透率并不因为通过的是水还是油而有所改变,即岩石的渗透率是一个常数。渗透率是岩石自身的性质,它是岩石的一个性质参数,只取决于岩石的孔隙结构。

但是,实际上用液体测得的渗透率往往不是一个常数,或因天然岩心中含有的黏土遇水膨胀而使渗透率变小,或因油的吸附而使渗透率降低。气体与岩石的物理化学作用小,在实验室中,一般用空气或氮气来测定岩石渗透率,从而求出岩石的气测渗透率,作为岩石的物性参数。

三、储集层岩石中的流体饱和度

在石油储量计算和储集层油气水动态分析中,不仅要了解储集层中储存流体的空间的大小,而且需要进一步了解孔隙空间中油、气、水各自所占体积的比例,也就是油、气、水的饱和度。

(一)流体的饱和度

储集层中油、气、水饱和度就是岩石单位孔隙体积中油、气、水各自所占体积的百分数。

油、气、水饱和度的表达式分别为

$$S_o = \frac{V_o}{V_p} \times 100\% = \frac{V_o}{\phi V_f} \times 100\% \quad (1-6)$$

$$S_g = \frac{V_g}{V_p} \times 100\% = \frac{V_g}{\phi V_f} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} \times 100\% = \frac{V_w}{\phi V_f} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 S_o, S_g, S_w ——分别为油、气、水的饱和度;

V_o, V_g, V_w ——分别为岩石孔隙体积内油、气、水所占体积。

当油层孔隙中只有油、水两相共存时,则 $S_o + S_w = 1$;当油层孔隙中油、水、气三相共存时,则 $S_o + S_w + S_g = 1$ 。

(二)束缚水及原始含油饱和度

纯油气层的任何部位都含有一定数量的不流动水,这些水被称为“束缚水”,它存在于岩石颗粒表面、颗粒接触的角隅处及微毛管孔隙中。

知道了束缚水饱和度,就能求出油层的原始含油饱和度,进而用体积法计算出油田的地质储量。原始含油饱和度公式为

$$S_{oi} = 1 - S_{wc} \quad (1-9)$$

式中 S_{oi} ——原始含油饱和度;

S_{wc} ——束缚水饱和度。

例 1-2 某油藏含油面积 A 为 14.4 km^2 ,油层有效厚度 h 为 10 m ,孔隙度 ϕ 为 20% ,束缚水饱和度 S_{wc} 为 30% ,原油地下体积系数 B_o (地层油与其在地面标准状况下脱气之后的体积之比)为 1.2 ,原油密度 ρ_o 为 860 kg/m^3 ,试计算该油藏的原始原油储量。

解 由式(1-6)及式(1-9)得原油地下体积为

$$V_o = S_o \phi V_f = (1 - S_{wc}) \phi Ah$$

则原油地面体积储量为

$$\begin{aligned} N &= V_o / B_o = (1 - S_{wc}) \phi Ah / B_o \\ &= [(1 - 0.3) \times 0.2 \times 14.4 \times 10^6 \times 10] / 1.2 \\ &= 1.68 \times 10^7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

原始原油储量为

$$1.68 \times 10^7 \times 860 = 1.445 \times 10^{10} \text{ kg} = 1.445 \times 10^7 \text{ t}$$

第三节 油藏流体的物理性质

油藏流体是指储存于地下的原油、天然气和地层水。油藏流体在地层中常处于高温、高压状态,且原油中溶解有大量烃类气体,从而使处于地下的油藏流体的物理性质与其在地面的性质有很大的不同。因此,石油工作者掌握油藏流体的物理性质是非常必要的。

一、天然气的高压物性

天然气的高压物性主要是指天然气在高温、高压下的物理特性,其中包括获得这些物性参数的方法。

(一)天然气的组成

地下采出的可燃气体统称天然气。天然气是以石蜡族低分子饱和烃为主的烃类气体和少量非烃气体组成的混合物。其化学组成包括:甲烷(CH_4)占70%~98%,乙烷(C_2H_6)占1%~10%,丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})等含量不多。天然气中含有少量非烃类气体,如硫化氢、二氧化碳、一氧化碳、氮及水蒸汽,有时也含有微量的稀有气体,如氦和氩等。

天然气是多组分的混合气体,不能像纯气体那样由分子式计算出恒定的摩尔质量。天然气摩尔质量的大小取决于天然气的组分构成以及各组分的含量,计算式为

$$M = \sum_{i=1}^n y_i M_i \quad (1-10)$$

式中 M ——天然气的摩尔质量;

y_i ——组分 i 的摩尔分数;

M_i ——组分 i 的摩尔质量。

(二)天然气的状态方程

理想气体的状态方程为

$$pV = nRT \quad (1-11)$$

式中 p ——气体压力,Pa;

V ——在压力 p 下的气体体积, m^3 ;

T ——绝对温度,K;

n ——气体的摩尔数;

R ——通用气体常数,通常为 $8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

天然气是真实气体,它与理想气体不同。真实气体分子有一定的体积和质量,而且分子之间有作用力;而理想气体分子则假设是无体积、无大小和无质量的质点,而且分子之间不存在作用力。一般只有在低压下才可考虑把理想气体的状态方程应用于天然气;而在高压下必须对理想气体状态方程进行修正,即引入一系数 Z ,从而得到天然气的状态方程

$$pV = ZnRT \quad (1-12)$$

式中 Z ——天然气压缩因子,它是给定压力和温度下,实际气体占有体积与相同压力和温度下的理想气体所占有的体积之比。

(三)天然气的体积系数和压缩系数

1.天然气的体积系数

一定质量的天然气,在油气藏条件下所占的体积 V 与标准状态下所占的体积 V_0 之比值,称为天然气的体积系数,其定义式为

$$B_g = \frac{V}{V_0} \quad (1-13)$$

2.天然气的压缩系数

等温条件下,单位体积气体随压力变化的体积变化率称为天然气的压缩系数,即

$$C_g = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1-14)$$

式中的气体体积可按真实气体的状态方程式(1-12)来求,即

$$V = nRT \frac{Z}{p}$$

把上式代入式(1-14)并求导,得

$$C_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T \quad (1-15)$$

(四)天然气的黏度

黏度是表征气体或液体流动时分子之间内摩擦力大小的物性参数。

在标准状态下,天然气的黏度通常不超过 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,而且相对分子质量愈高,黏度愈小。在低压下,天然气的黏度随温度的升高而增大,而与压力无关。在高压下(一般超过 3 MPa),天然气黏度变化趋势与液体的相同,即压力增加,天然气黏度增大;温度增加,天然气黏度降低;气体相对分子质量增加,气体黏度也增加。

非烃类气体(如空气、氮气、二氧化碳及硫化氢)的黏度高于烃类气体的黏度。

(五)天然气在原油中的溶解和分离

油藏烃类的相态变化主要是气液两相间的平衡和转化,这种平衡和转化又总是以气体的溶解和分离的方式表现出来。油气的溶解和分离这对矛盾的转化条件、方式及其计算方法在解决油气矿场的实际问题时是很有用的。

1.天然气在原油中的溶解

单组分气体在液体中的溶解服从亨利定律,即温度一定时,溶解度和压力成正比

$$R_s = \alpha p \quad (1-16)$$

式中 R_s ——压力为 p 时单位体积液体中溶解的气体量,即溶解度;

p ——溶解时的气体压力;

α ——溶解系数,即在一定温度下,每增加单位压力时,单位体积液体中溶解的气体量。

溶解度反映了液体中溶解气体量的多少,而溶解系数则反映了液体溶解气体的能力。式(1-16)对不易互溶的气-液体系是合适的,但用于化学结构相似的烃类气体在原油中的溶解则有较大的偏差。对于多组分的天然气,当压力不是很高时,每一组分的溶解度基本遵守亨利定律,然而总的溶解度就不符合亨利定律了,即天然气的溶解度不是常数。

外界压力、温度、气体与液体的成分以及气体与液体的接触方式和接触时间,对气体的溶

解度都有影响。

2. 天然气从原油中的分离

在石油工程中,经常遇到的是气体从石油中分离出来的问题。当油层压力降至泡点压力(也称饱和压力)以下时,就会有天然气自原油中分离出来,天然气从原油中分离出来的过程一般称为脱气过程。

油气的分离方式通常有两种基本类型:一种是接触分离(也叫一次脱气),另一种是微分分离(也叫多次脱气)。

接触分离是一次或分几次将系统的压力降到指定的脱气压力,但在油气分离过程中分离出来的气体始终与油保持接触,系统的组成不变。微分分离是分多次将压力降到指定压力,每一次降压后,分出的气体都从容器内排出,使气液分开,亦即脱气是在不断降压、不断排气、系统的组成也在不断变化的过程中进行的。一般地,一次脱气脱出的气体多,剩余油少,测出的溶解气油比大,而且分离出的气较重,脱气油密度较大;而多次脱气则相反。

二、地层油的高压物性

地层油在地下是处于高温、高压状态,且溶有大量的天然气,所以地层油的高压物性与地面原油的性质有很大的差别。

(一) 地层油的溶解气油比

地层油的溶解气油比 R_s 是指每立方米地面原油在地下所溶解的天然气在标准状况下的立方米数。溶解气油比是地层油溶解天然气量的一个量度指标。地层油的溶解气油比和天然气在石油中的溶解度的概念实质上是一致的。图 1-3 给出了某地层油的天然气溶解气油比随压力变化的关系曲线。

在油藏温度和原始压力下的溶解气油比称为原始溶解气油比,通常以 R_{si} 表示。从图 1-3 可见,在油藏原始压力 p_{si} 下的原始溶解气油比与泡点压力 p_b 下的溶解气油比是相等的,因此,原始溶解气油比也可以说是泡点压力下的溶解气油比;当压力下降至泡点压力以下时,溶解气油比将随压力降低而减小。

地层油中总是溶有天然气,但溶气量相差很大。当地面 1 m^3 油处于地层条件下时,有的仅溶解有 1 m^3 的天然气,有的却溶解多达几百立方米的天然气。正是由于地层油总是溶解一定量的天然气,故地面原油当其处于地下时,其体积总是会有所增大。

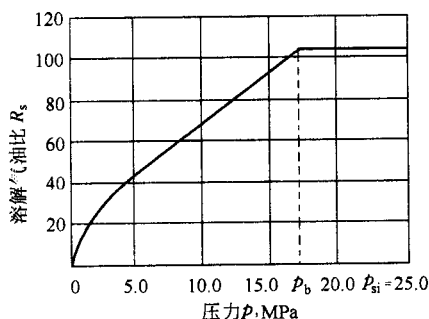


图 1-3 地层油溶解气油比与压力的关系曲线

(二) 地层油的体积系数

地层油的体积系数 B_o 又称原油地下体积系数,它被定义为原油在地下的体积 V_o (即地层油体积)与其在地面脱气后的体积 V_s 之比,即

$$B_o = \frac{V_o}{V_s} \quad (1-17)$$

式中 B_o ——地层油体积系数;

V_o ——原油在地下的体积;

V_s ——原油在地面标准状况下脱气后的体积。

一般情况下,由于溶解气和热膨胀的影响远超过弹性压缩的影响,地层油的体积总是大于它在地面脱气后的体积,故地层油的体积系数 B_o 一般都大于 1。图 1-4 给出了地层油体积系数和压力的关系。从中看出,当压力大于泡点压力 p_b 时, B_o 随压力 p 的增加而降低,这是由于单相地层油体积压缩的结果,这时不再有气体溶解;当压力 p 小于泡点压力 p_b 时, B_o 随压力 p 的增加而增加,这是由于 $p < p_b$ 后,原油继续溶解气体的结果;当压力 p 等于 p_b 时, B_o 达到最大值。

当油藏压力低于饱和压力时,在给定压力下地层油和其释放出气体的总体积(即两相体积)与原油在地面脱气后的体积之比,称为地层油的两相体积系数。

$$B_t = \frac{V_o + (R_{si} - R_s)V_s B_g}{V_s} = B_o + (R_{si} - R_s)B_g \quad (1-18)$$

式中 B_t ——地层油两相体积系数。

从式(1-13)和式(1-18)可以看出:

- 1) 当压力 p 等于泡点压力 p_b 时, $R_s = R_{si}$, 则 $B_t = B_o$;
- 2) 当压力 $p = 0.1 \text{ MPa}$ 时, $R_s = 0, B_g = 1$, 则 $B_t = B_o + R_{si}$ 为最大。

在图 1-4 中的 $B_o - p$ 曲线上可以补画出 $B_t - p$ 曲线,如图 1-5 所示,其中实线是单相地层油的体积系数曲线;虚线是地层油两相体积系数曲线,它是一条双曲线型曲线。

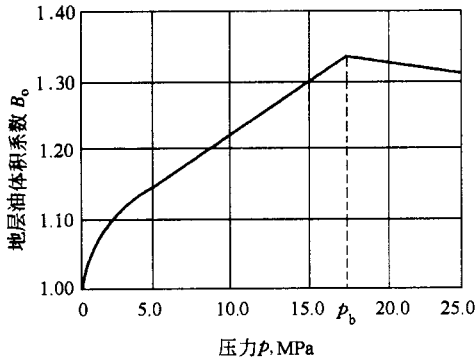


图 1-4 地层油体积系数和压力的关系曲线

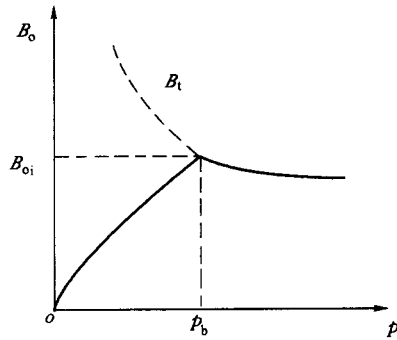


图 1-5 B_t 、 B_o 和 p 的关系曲线

(三) 地层油的压缩系数

地层油压缩系数 C_o 是指压力变化单位值时,单位体积地层油的体积变化量,即

$$C_o = -\frac{1}{V_o} \left(\frac{\partial V_o}{\partial p} \right)_T$$

$$\approx -\frac{1}{V_o} \frac{\Delta V_o}{\Delta p} = -\frac{1}{V_o} \frac{V_{ob} - V_o}{p_b - p} \quad (1-19)$$

式中 C_o ——原油等温压缩系数, MPa^{-1} ;

p_b, p ——分别为原油的泡点压力和地层压力, MPa ;

V_{ob}, V_o ——分别为泡点压力 p_b 和压力 $p (p > p_b)$ 下的地层油体积, m^3 。

(四) 地层油的黏度

地层油黏度主要与油中溶解的气体量及油的温度有关。油的溶解气油比越大,其黏度越低。

地层油的黏度与压力、温度的关系曲线如图 1-6 所示。

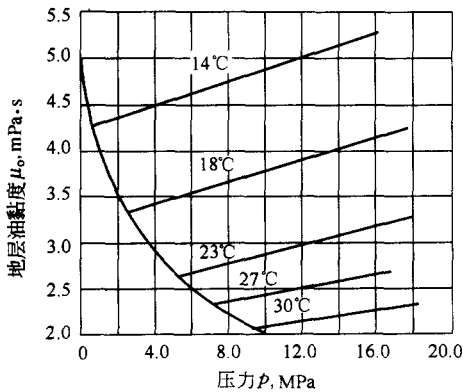


图 1-6 地层油黏度与压力、温度的关系曲线

图中每条等温线的拐点压力都是相应温度下该地层油的泡点压力,从图中看出:

- 1) 地层油的黏度随温度增加而降低;
- 2) 当压力高于泡点压力时,地层油的黏度随压力的增加稍有增大;
- 3) 当压力低于泡点压力时,地层油的黏度随压力的降低而急剧增大,这与地层油中溶解气的释出有关。

地层油的溶解气油比、体积系数、压缩系数以及地层油的黏度等高压物性,与地层油的高温、高压特别是其中溶解有大量天然气有密切的关系。

三、地层水的高压物性

这里的地层水指的是油层水,它包括处于油藏边部和底部的边水和底水,此外还包括层间水以及与油共存的束缚水(也称残余水)。了解这些水的性质和组成,可以分析油井出水与原油性变化的原因,分析水驱油的洗油能力及判断边水流向等。

(一) 地层水的化学组成及分类

与地面水不同,油层水因与岩石和石油接触,或者是由于古沉积条件,经常含有各种金属盐类,如钠、钾、钙、镁盐等,其中主要是氯化钠,故常称其为盐水。含盐浓度用矿化度表示,即用 mg/L 来表示。

通常将水分为 CaCl_2 、 MgCl_2 、 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 四种水型。地层水主要为 NaHCO_3 和 CaCl_2 水型,地面水则多为 Na_2SO_4 水型。

(二) 地层水的高压物性

由于地层水中含有大量的盐,所溶解天然气量很少,所以溶解气对地层水高压物性的影响很小。

地层水的体积系数一般在 0.99~1.06 之间,压缩系数一般为 $(3.7\sim 5.0)\times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$ 。地层水的黏度受温度影响很大,当温度由 20 °C 变化到 80 °C 时,水的黏度大约从 1.5 mPa·s 变化到 0.2 mPa·s。

第四节 流体在地层中的渗流规律

砂岩油气层是典型的多孔介质,其孔隙的空间结构极其复杂,地层流体在其中的流动属地下渗流,这种渗流规律是计算油气井产量的理论基础。

一、单相流体的渗流规律

当储集层流体处于单相渗流时,其流动规律可以用达西公式来描述。

(一) 液体单相渗流

1. 液体单相渗流

当单一液流处于单向流动(即线性流动时),可用前面讲过的达西公式(1-4)来表达。

2. 液体径向渗流

根据达西定律,在供给边缘压力不变的圆形地层中心一口井的产量公式为

$$q_o = \frac{2\pi K h (p_e - p_{wf})}{\mu_o B_o \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (1-20)$$

式中 q_o ——油井产量(地面), m^3/s ;
 K ——油层渗透率, m^2 ;
 h ——油层有效厚度, m ;
 B_o ——原油体积系数;
 μ_o ——地层原油的黏度, $Pa \cdot s$;
 p_e ——供给边缘压力, Pa ;
 p_{wf} ——井底流动压力, Pa ;
 r_e ——油井供油(泄油)半径, m ;
 r_w ——井眼半径, m 。

利用上述公式即可对线性或径向渗流的原油产量进行计算。

(二) 气体单相渗流

根据达西定律,在均质、等厚、定压边界、圆形气层中有一口井稳定生产时,其产量公式为

$$q_g = \frac{\pi K_g h Z_{sc} T_{sc} (p_e^2 - p_{wf}^2)}{p_{sc} T \bar{\mu}_g \bar{Z} \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (1-21)$$

式中 q_g ——标准状态下气体产量, m^3/s ;
 K_g ——气层渗透率, m^2 ;
 h ——气层有效厚度, m ;
 $\bar{\mu}_g$ ——平均压力下气体黏度, $Pa \cdot s$;
 \bar{Z} ——平均压力下气体的压缩因子;
 T ——气层温度, K ;
 p_{sc} ——标准压力, Pa ;
 T_{sc} ——标准温度, K ;
 Z_{sc} ——标准状态下气体的压缩因子。

二、多相流体的渗流规律

实际油层中,都存在着两种或两种以上的流体,例如油—气、油—水或油—气—水等,特别是在注水油田中,油层中经常是油水共存、油水并流。当油层压力下降到饱和压力以下时,油层中还会发生油、气、水三相共存和并流现象。在这种多相流动情况下,由于各相流体的物理化学性质不同、饱和度不同、对岩石的润湿性不同,且各相流体之间存在界面,在多孔岩石中又呈现毛管力,因此各相流体在岩石中并流时会发生相互干扰。