

高等学校教材

海洋油气开采原理与技术

张红玲 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油工业出版社

海洋油气开采原理与技术

——



石油工业出版社

高等学校教材

海洋油气开采原理与技术

张红玲 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据海上油气开采的特点,以海上油气开采和集输工艺过程为主线,系统介绍海上油气开采与集输工程的基本概念、原理、方法、工艺技术和设计计算方法。内容包括油气田开发工程基础、海上油气田生产系统、海上油气井生产原理与技术、注水与增产增注技术、油气水处理、油气储存与集输等。

本书可作为海洋油气工程及其相关专业本科生的教材,也可供现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋油气开采原理与技术/张红玲编著.
北京:石油工业出版社,2013. 10
(高等学校教材)
ISBN 978-7-5021-9727-8
I. 海…
II. 张
III. 海上油气田—油气开采—高等学校—教材
IV. TE53
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 197474 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:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16.5

字数:420 千字

定价:32.00 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

随着陆上石油资源的日益减少和开发难度的逐渐增大,从陆地走向海洋、走向深海已经成为石油开发的必然趋势。为了适应我国海上石油工业发展和石油高等教育改革的要求,根据石油高等教育教材建设规划和海洋油气工程专业教学计划,中国石油大学(北京)组织教师编写了相关教材。

《海洋油气开采原理与技术》是针对海洋油气工程专业本科生编写的教材。全书力求以加强专业基础为出发点,将油气田开发过程中各部分的专业知识有机结合起来,突出油气田开发技术过程的完整性,使学生系统掌握油气田开发工程领域的专业知识。

根据海洋油气工程所处的特殊地表环境对石油开采方式的要求,本书突出海洋油气工程的特殊井型、特殊开采方式选择,内容侧重于油层物理基础、渗流力学、油藏工程方法、采油工程原理和海上油气集输的基础知识,注重各部分内容之间的技术界面和衔接,加强与相关学科的交叉。

本书由张红玲执笔,刘慧卿审阅。在本书的编写过程中,得到了中国石油大学(北京)石油工程学院、石油工业出版社的大力支持,在此表示真诚的谢意!

由于编者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请使用本教材的师生及有关专家读者批评指正。

编 者
2013年3月

目 录

绪论	(1)
第一章 油气田开发工程基础	(4)
第一节 油藏流体的物理性质	(4)
第二节 油藏岩石的物理性质	(13)
第三节 渗流基本规律与基本理论	(21)
练习题	(35)
第二章 海上油气田开发设计与动态分析	(37)
第一节 海上油气田开发前期研究	(37)
第二节 海上油气田开发设计	(42)
第三节 油藏开发动态分析方法	(58)
练习题	(69)
第三章 海上油气田生产系统	(71)
第一节 固定平台生产系统	(71)
第二节 浮式生产系统	(77)
第三节 水下生产系统	(89)
第四节 海上生产系统的选择	(100)
练习题	(105)
第四章 海上油气井生产原理与技术	(106)
第一节 自喷采油	(106)
第二节 气举采油	(116)
第三节 电潜泵采油	(123)
第四节 其他采油方式	(128)
第五节 海上油田采油方式的选择	(140)
练习题	(144)
第五章 注水与增产增注技术	(146)
第一节 注水技术	(146)
第二节 酸化技术	(174)
第三节 水力压裂技术	(194)
练习题	(212)
第六章 油气水处理	(214)
第一节 原油处理	(214)
第二节 天然气处理	(235)
第三节 水处理	(243)
练习题	(244)

第七章 海上油气储存与集输.....	(245)
第一节 海上储油系统.....	(245)
第二节 海上装油系统.....	(249)
第三节 海上油气集输模式.....	(255)
练习题.....	(257)
参考文献.....	(257)

绪 论

随着全球油气需求的快速增长,世界石油工业正面临着极大的挑战。由于陆上油气储量增长乏力,越来越多的国家加大了对海洋油气资源勘探开发的力度。

大陆边缘是大陆和大洋底的过渡地带,占海洋总面积的 25%,沉积层厚度达数千米,蕴藏着极其丰富的油气资源,含有的潜在资源占海底总资源的 99%,因此海上勘探开发前景巨大。大陆边缘主要由大陆架、大陆坡和大陆隆三部分组成,其中大陆架的石油资源非常丰富。

海洋油气资源分布极不均衡,主要富集于四个区域。一是中美洲墨西哥湾、加勒比海、马拉开波湖以及巴西海域,其中墨西哥湾和马拉开波湖是全世界勘探开发最早的海上油气区域;二是北欧、北美大陆架,包括北海、阿拉斯加以及加拿大北部等;三是中东的波斯湾;四是东亚、东南亚海域,包括中国海域、印度尼西亚海域以及澳大利亚海域等。其中,波斯湾海域石油、天然气储量最丰富,约占总储量的一半左右。其次是委内瑞拉的马拉开波湖、北海、墨西哥湾,以及中国、东南亚、澳大利亚、西非等海域。

我国海岸带、大陆架和深海区蕴藏着相当丰富的海洋油气资源。渤海盆地面积为 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,中新生代沉积厚度近万米。黄海盆地面积为 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,以新生代沉积为主。东海陆架盆地面积为 $46 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国最大的沉积盆地之一。南海北部陆架区油气资源丰富,其中珠江口盆地面积为 $14.7 \times 10^4 \text{ km}^2$;莺歌海和琼东南盆地面积为 $7.9 \times 10^4 \text{ km}^2$;北部湾盆地面积为 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据 2008 年公布的第三次全国石油资源评价结果,中国海洋石油资源量为 $246 \times 10^8 \text{ t}$,占全国石油资源总量的 23%;海洋天然气资源量为 $16 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占全国天然气资源总量的 30%。在中国海洋的油气资源中,70%又蕴藏于深海区域,而当前中国海洋石油探明程度为 12%,海洋天然气探明程度为 11%,远低于世界平均水平。

一、世界海洋石油工业发展概况

海洋石油开发是一个由浅水到深海、由简易到成熟的发展过程。世界海洋油气开发主要经历了初始阶段、起步阶段和发展阶段。

1. 海洋开发的初始阶段

从 1897 年到 1947 年,是海洋石油开发的初始阶段。1897 年美国加利福尼亚海岸萨姆兰德油田用木桩作基础建立了第一座海上钻井平台,拉开了海洋石油开发的序幕。1920 年委内瑞拉在马拉开波湖发现油田,1930 年,苏联在里海发现油田。这个阶段全世界只有少数几个滩海油田,大多采用结构简单的木质平台和人工岛,只能在近岸的海边和内湖采油。技术落后和成本高昂困扰着海洋石油的开发。

2. 海洋开发的起步阶段

从 1947 年到 1973 年,海洋石油工程发生了巨大的变化。1947 年是海洋石油开发的划时代开端,美国在墨西哥湾成功建造了世界上第一座钢制固定平台。同年在美国路易斯安那州马尔根城西南 12 海里(n mile)的海域,首次使用了海上移动式钻井装置——带有驳船的钻井平台。1953 年美国建成了世界上第一艘自升式钻井平台——“马格洛利亚号”,工作水深 12m。1954 年美国建造了第一艘坐底式平台——“查理先生号”,用于密西西比河河口钻井。

海上移动式钻井装置的不断更新,推动了海上石油勘探向大陆架迈进。同时,海上采油设备也在迅速发展,出现了各种适应大陆架开发的工程设施,保证了大陆架油田建设的需要。到 20 世纪 70 年代初,海上石油开采已遍及世界各大洋。

3. 海洋开发的发展阶段

从 1973 年至今是海洋石油开发的发展阶段。1973 年全球石油价格猛涨,进一步推动了海洋石油开发的历史进程,特别是为了适应对环境恶劣的北海和深水油气开发的需要,人们不断采用更先进的海洋工程技术,建造能够抵御更大风浪并适用于深水的海洋平台,如张力腿平台(TLP)、浮式圆柱形平台(SPAR)等,海洋石油开发从此进入大规模开发阶段。近 40 年中,海洋原油产量的比重在世界总产油量中增加了 1 倍。进军深海是近年来世界海洋石油开发的主要技术趋势之一。

截至 2005 年年底,在世界海洋中已经发现了 521 个油田,其中,欧洲和地中海 25 个,北海 110 个,意大利、亚德里亚海 20 个,黑海和里海 17 个,南美洲 43 个,非洲近海 27 个,西非近海 85 个,波斯湾 60 个,印度次大陆沿岸海域 2 个,远东近海 23 个,印度和马来西亚近海 15 个,澳大利亚东部和新西兰近海 3 个,澳大利亚西北大陆架 12 个,南部吉普斯兰德海盆 19 个,北海近海 44 个,美国墨西哥湾 16 个。

二、我国海洋石油工业发展概况

我国的海洋石油开发起步比国外晚了 60 年,迄今已经历了两个发展阶段。

1. 自力更生探索阶段

20 世纪 50 年代,我国由于尚无专门的海上勘探装备,采取“以陆地推测海域”的办法,1957 年在海南岛附近地区找到油气苗,并推测出海上生油凹陷。1965 年,在离莺歌海村水道口外 4km、水深 15m 处用浮筒式钻井装置打的海 2 井发现了原油,这是我国海上第一口油气发现井。1966 年在渤海湾建起了第一座固定式钻井平台,钻探的渤海第一口探井——海 1 并于 1967 年喷出了原油。至 1979 年我国海上共钻井 100 口,发现 9 个含油构造,建成 4 座简易采油平台,最高年产油 17×10^4 t。

2. 合作开发阶段

为了科学合理地开发海洋资源,1982 年 1 月 30 日国务院正式颁布《中华人民共和国对外合作开采海洋石油资源条例》,作为我国海洋石油对外开放的基本政策法规,为开展对外合作提供了法律依据。同年成立中国海洋石油总公司,专门负责海洋石油资源的勘探开发。自此,我国的海洋石油开发走上了专业化、正规化、国际化发展的快车道。

三、海洋石油开采的内容

1. 海上采油

海上采油是从 20 世纪初开始的,很多国家曾先后在浅海的堤坝、栈桥、人工岛及不同的木质、混凝土、钢质平台上进行过海底石油的开采。随着海洋石油钻探进入环境恶劣的深海区,海上采油开始采用各种大型的固定平台、牵索塔式平台和张力腿式平台。各种海上建筑物上的采油、作业方法和所用的采油机械设备,与陆地的差别不大。早在 20 世纪 40 年代初,为了避免浮冰对海上采油设备的撞击,曾在 20 多米深的水下,安装过水下采油井口设备。随着深

海采油的需要,海底采油系统成为目前最引人注意的海洋石油开发技术,它具有设备简单、安全可靠和经济实用等特点。

目前,海上采油方法主要有自喷采油、气举采油、电动潜油离心泵采油、水力活塞泵采油、水力喷射泵采油、螺杆泵采油等。

2. 油气集输与储运

海上油气处理工艺与陆上相比,大体相同。不同之处是海上的处理设备布置得比较集中,自动化程度高,效率高。用于浮式生产装置上的处理设备,还要求在晃动状态下仍然可以正常工作。

海上油气输送主要有海底管道输送和油轮输送两种方式。由于海底管道建成后,可以连续输油,输送量大,受水深、气候、地形等条件的影响较小,输油效率高、能力大,且管线铺设的工期短、投产快,一般海上油气集输广泛采用海底管道输送方式。对于海上天然气的输送,最安全、最可靠的输送方式为管道输送。近年来,其他输送方式也有所发展。

四、海上油气田开发生产的主要特点

1. 有限期性

陆地油气田从发现开始,经过油藏评价、开发和生产阶段,直到废弃,需要 50 年或更长时间。而海上油气田因受平台寿命的限制,一般生产期为 15~20 年,有的甚至更短。因此,海上油气田的生命期是有限的,与陆地油气田相比开发速度要快,采油速度要高,又要达到最佳的经济效益。

2. 复杂性(不确定性、多边性)

海上油气田在评价阶段不可能钻太多的评价井,在开发阶段也要按照稀井高产的原则,依据有限的地球物理、钻井和测试数据,很难掌握地质的变化规律。因此海上油气田地质参数的不确定性和生产动态的多变性,可能会变得更为突出、更加复杂。

3. 高风险性

海上平台等设施上设备、流程密集,空间狭小,作业岗位多,交叉作业多,风险度高于陆上石油开发。此外,由于海况恶劣、地质条件复杂,又增加了海上油气田开发的风险性。

海上油气田开发还有其他风险,如政治、战乱、技术、金融等,可见海上油气田开发风险相当高。

4. 高科技性

由于有限期性、复杂性、综合性、高风险性,海上油气田开发要求必须采用当今世界上最先进的工艺技术,进行合理、经济有效的开发。

5. 高投入

海上油气田开发建设需要建造生产平台、生活平台和动力平台,要修海底管线,还要钻开发生产井。同陆上油气田相比,投资要大得多,一般需要 5~6 年或更长一段时间才能偿还全部勘探开发投资。

第一章 油气田开发工程基础

第一节 油藏流体的物理性质

油藏是指具有同一水动力学系统的油气聚集场所。油藏流体是指储存于岩石孔隙中的石油、天然气和水。油藏流体处于高温高压环境下,特别是其中的石油溶解有大量的烃类气体,决定了油藏流体具有特殊的物理性质。

石油和天然气是多组分烃类物质的混合物。石油主要由烷烃、环烷烃和芳香烃组成,此外还含有少量的氧、硫和氮等化合物。天然气主要由甲烷、乙烷、丙烷、丁烷等烃类组成,此外还含有少量的一氧化碳、二氧化碳、氮气和硫化氢等。

一、流体相态特征

相是指体系中具有相同物理和化学性质的任何均匀部分。组成相的物质可以是混合物,也可以是化合物;相间具有明显的界面,用机械方法可以分开。在油藏条件下,具有化学稳定性的每一种化合物称为组分。体系中所含组分以及各组分在总体系中所占的比例称为该体系的组成。相态特征不仅与流体组成有关,而且还与其所处的压力、温度条件等有关。

1. 单组分体系的相态特征

对于一个组成固定的体系,表示压力(p)、温度(T)或体积(V)的关系图称为相图。单组分物质体系相图即纯物质的饱和蒸气压曲线,如图 1-1 所示。

露点压力是指温度一定时,开始从气相中凝结出第一批液滴时的压力。泡点压力是指温度一定时,开始从液相中分离出第一批气泡时的压力。单组分物质的饱和蒸气压曲线实际是该物质的露点与泡点的共同轨迹线。单组分物质体系的临界点为该体系两相共存的最大压力和最高温度点。图 1-2 是油气藏中常见的几种纯物质的蒸气压曲线。

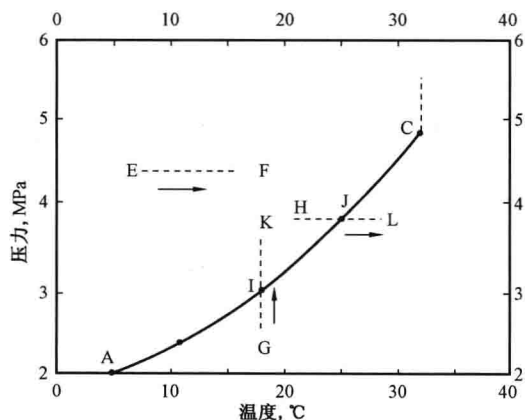


图 1-1 乙烷的 $p-T$ 相图

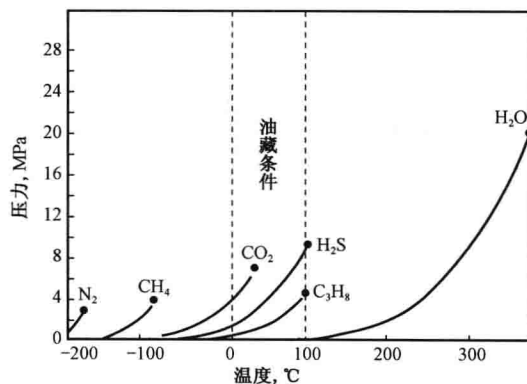


图 1-2 常见纯物质的蒸气压曲线

2. 多组分体系的相态特征

多组分体系相图与单组分体系相图之间的差别:

(1)多组分体系相图不是单调的曲线,而是开口环线。泡点线和露点线围成的区域为两相区。两相区的左上侧为液相区,两相区的右下侧为气相区。

(2)多组分体系的临界点不是体系的最高温度和最高压力点,多组分体系的临界点定义为泡点线和露点线的交汇点。

(3)组分的比例不同,两相区面积不同。

(4)多组分体系相图中会出现反常凝析现象。降压过程中液体变为气体是正常的;而降压过程中气体凝结为液体就属于反常的。图1-3中,“B→D”为反常凝析过程,“D→B”为反常蒸发过程。烃类体系产生反常现象的原因主要有两个。一是烃类体系的组成,当一个体系的轻烃和重烃比例合适、轻重差异恰当时(表1-1),就会构成凝析体系;二是压力、温度条件,一个油气藏只有压力、温度合适,才能成为凝析油气藏,才会出现反常凝析(或蒸发)现象。

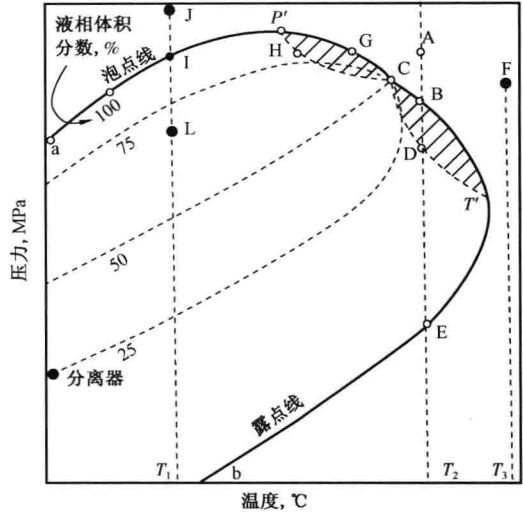


图 1-3 多组分烃类体系的 $p-T$ 相图

表 1-1 典型的天然气组成数据

组分	体积分数, %		
	干气	凝析气	油田伴生气
C ₁	96.00	75.00	27.52
C ₂	2.00	7.00	16.34
C ₃	0.60	4.50	29.18
C ₄	0.30	3.00	22.55
C ₅	0.20	2.00	3.90
C ₆	0.10	2.50	0.47
C ₇₊	0.80	6.00	0.04
合计	100.00	100.00	100.00
相对分子质量	17.584	27.472	38.568
相对密度	0.607	0.948	1.331

3. 多组分烃类体系相图的应用

如图 1-3 所示,对多组分烃类体系的 $p-T$ 相图分析如下。

点 J: 烃类体系为单相(液相),代表一个未饱和油藏,油藏原始压力高于油藏泡点压力。

点 I: 烃类体系处于饱和状态,代表一个饱和油藏,油藏的原始压力等于油藏泡点压力。

点 L: 烃类体系处于过饱和状态,代表一个过饱和油藏或带气顶的油藏。

点 A: 烃类体系处于反常凝析区的上方,代表一个凝析气藏。

点 F: 表示纯气藏,无论压力如何变化,烃类体系始终是气相,代表一个干(或湿)气藏。

二、地层油的高压物性

地层油处于高温、高压下,且溶解有大量气体,所以地层原油的高压物性与地面原油性质存在很大差别。

1. 地层油的溶解气油比

通常把地层油在地面标准状况下进行一次脱气分离出的气体体积与地面脱气油体积的比值称为溶解气油比。

$$R_s = \frac{V_g}{V_s} \quad (1-1)$$

式中 R_s ——溶解气油比, m^3/m^3 ;

V_g ——地面标准状况下一次脱气分离出的天然气体积, m^3 ;

V_s ——地面脱气油体积, m^3 。

典型地层油溶解气油比曲线如图 1-4 所示。

在油田生产中常用到生产气油比的概念,它的含义是某井(或某区块、或某油田)在一定时间内的产气量(m^3)与产油量(m^3)之比,用 R_p 表示。

一般情况下,生产气油比大于或等于溶解气油比。

2. 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,是指原油在地下的体积与其在地面脱气后的体积之比。用公式表示为:

$$B_o = \frac{V_o}{V_s} \quad (1-2)$$

式中 V_o ——地层油的体积, m^3 ;

V_s —— V_f 体积的地层油在地面脱气后的体积, m^3 。

一般情况下,地下原油的体积受溶解气、热膨胀和压缩性三个因素影响。由于溶解气和热膨胀对原油体积的影响(使之变大)大于压缩性对原油体积的影响(使之变小),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一般大于 1。

图 1-5 中实线为地层油的体积系数与压力的关系曲线。当压力低于泡点压力 p_b 时,地

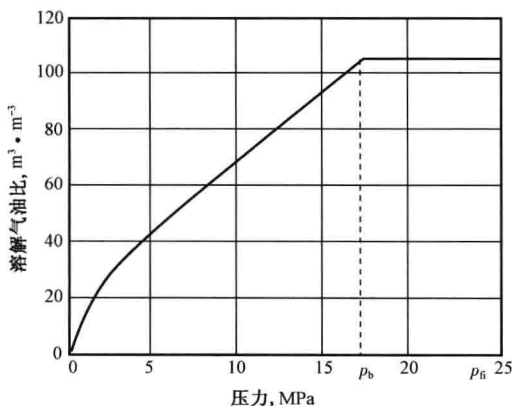


图 1-4 典型地层油溶解气油比曲线

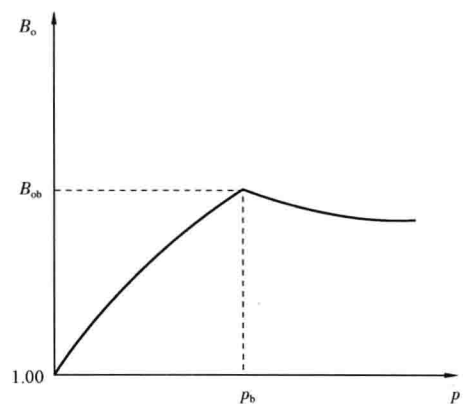


图 1-5 体积系数与压力的关系

层油的体积系数 B_o 随压力增加而增加,这是由于压力上升原油中溶解气量增加,原油体积膨胀;当压力高于泡点压力 p_b 时,随着压力的上升,地层油的体积系数 B_o 变小,这是由于压力上升原油体积弹性收缩;当压力等于泡点压力 p_b 时,地层油的体积系数最大。泡点压力下地层油的体积系数常用 B_{ob} 表示。油藏原始压力下地层油的体积系数常用 B_{oi} 表示。

3. 地层油的密度和相对密度

地层油的密度是指单位体积地层油的质量,其数学表达式为:

$$\rho_o = \frac{m_o}{V_o} \quad (1-3)$$

式中 ρ_o ——地层油密度, kg/m^3 ;

m_o ——地层油质量, kg ;

V_o ——地层油体积, m^3 。

由于溶解气的关系,地层油密度比地面脱气油密度要低几个甚至十几个百分点。

当压力低于泡点压力 p_b 时,地层油密度随压力的增加而降低;当压力高于泡点压力 p_b 时,地层油密度随压力的增加而增加。矿场上习惯使用地面油相对密度参数,按石油行业标准,地面油相对密度定义为:20℃时的地面油密度与4℃时的水密度之比,用符号 d_4^{20} 或 γ_o 表示。

4. 地层油的等温压缩系数

地层油的弹性大小用等温压缩系数 C_o 表示。地层油等温压缩系数定义为在等温条件下,单位体积地层油随压力变化体积的变化率,用公式表示为:

$$C_o = -\frac{1}{V_o} \left(\frac{\partial V_o}{\partial p} \right)_T \approx -\frac{1}{V_o} \frac{\Delta V_o}{\Delta p} \quad (1-4)$$

式中 C_o ——地层油压缩系数, MPa^{-1} ;

V_o ——地层油体积, m^3 。

油藏压力 p 与泡点压力 p_b 间的平均压缩系数可表示为:

$$\frac{\partial V_o}{\partial p} \approx \frac{\Delta V_o}{\Delta p} = \frac{V_{ob} - V_o}{p_b - p} \quad (1-5)$$

$$\text{则 } C_o = -\frac{1}{V_o} \frac{V_{ob} - V_o}{p_b - p} = -\frac{1}{B_o} \frac{B_{ob} - B_b}{p_b - p} = \frac{1}{B_o} \frac{B_{ob} - B_b}{p - p_b} \quad (1-6)$$

式中 V_{ob} ——泡点压力 p_b 下地层油体积, m^3 ;

V_o —— p (高于泡点压力 p_b)压力下地层油体积, m^3 ;

p_b ——泡点压力, MPa ;

p ——油藏压力, $p > p_b$, MPa 。

通常情况下地面原油的等温压缩系数为 $(4 \sim 7) \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$,地层油的等温压缩系数为 $(10 \sim 140) \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$ 。

5. 地层油的黏度

原油的黏度取决于它的化学组成、溶解气油比、压力和温度等条件。原油黏度的变化范围很大,可以从零点几个毫帕·秒到上万毫帕·秒。

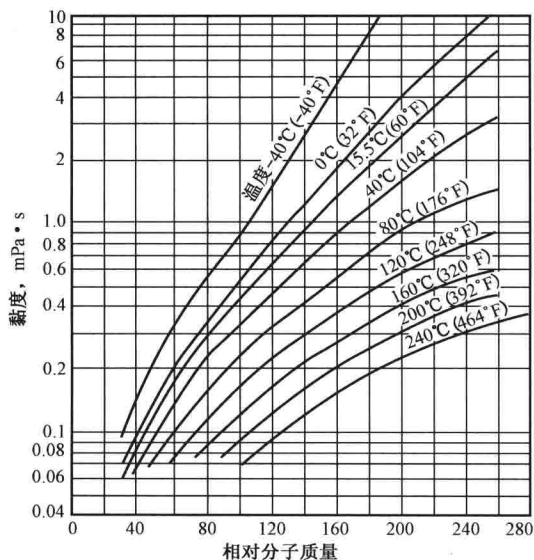


图 1-6 原油黏度与相对分子质量的关系曲线
(据 Brown, 1948)

3) 压力和溶解气

由于原油中溶解有大量的天然气,地层油黏度对压力也十分敏感。原油黏度与压力的关系如图 1-8 所示。

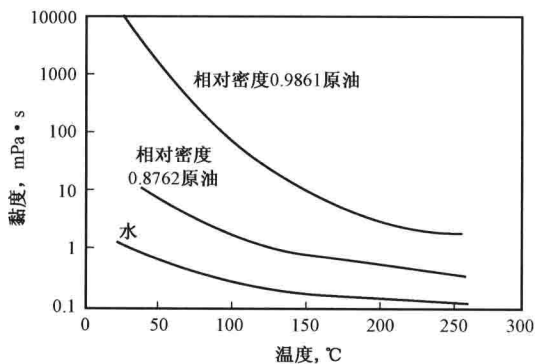


图 1-7 原油黏度与温度关系曲线

1) 原油的化学组成

原油的化学组成是影响原油黏度的内在因素。通常,原油的相对分子质量越大,黏度越高,如图 1-6 所示。原油中重烃、非烃物质(胶质+沥青质)等大分子化合物的含量对原油的黏度有着重大影响。原油中重烃、胶质+沥青质含量多,使原油黏度增大,甚至出现非牛顿流体的黏滞特性。

2) 温度

地层油和地面脱气油对温度都十分敏感。温度增加,液体分子运动速度增大,液体分子间引力减小,黏度降低。各种原油对温度的敏感性不同,在一定的温度范围内,温度每升高 10°C ,原油黏度约下降一半。原油黏度与温度的关系近似对数曲线,如图 1-7 所示。

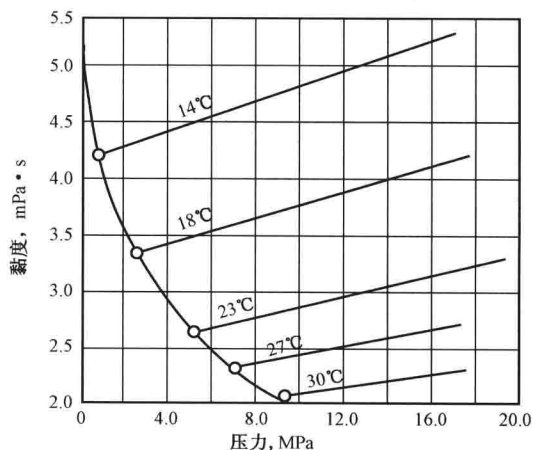


图 1-8 原油黏度与压力关系曲线

当压力低于泡点压力时,随压力的上升,原油中溶解气量增加,液层内部摩擦力减小,黏度随之降低。

当压力高于泡点压力时,压力增加引起地层油的弹性压缩,原油密度增加,分子间距变小,液层内部摩擦力增大,因而黏度增加。

当压力等于泡点压力时,原油中溶解气量达到最大值,原油的组分达到最佳组合,因而此时原油黏度值最低,或称极小值。

三、天然气的高压物性

天然气是从地下油气藏中采出的可燃气体,是由石蜡族低分子饱和烃类气体和少量非烃类气体组成的混合物。

1. 天然气的组成、视相对分子质量及相对密度

1) 天然气的组成

在天然气的组分中,甲烷(CH_4)占绝大部分,乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})等含量不高,此外还含有少量非烃类气体,如硫化氢(H_2S)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、氮气(N_2)、氧气(O_2)、氢气(H_2)和水蒸气(H_2O)等,有时也含有微量的稀有气体,如氦(He)和氩(Ar)等。典型的天然气组成如表 1-1 所示。

在标准状况下,甲烷和乙烷是气体。丙烷、正丁烷($n\text{C}_4\text{H}_{10}$)和异丁烷($i\text{C}_4\text{H}_{10}$)也是气体,但压缩冷却后易液化,是民用液化气的主要成分。戊烷和戊烷以上(常用 C_5^+ 表示)的轻质油称为天然汽油(NG)。

2) 天然气的视相对分子质量

天然气是多组分混合物,本身没有分子式,不能像纯组分气体那样由分子式计算出相对分子质量。为了工程计算方便,人为地将标准状况下(0°C , 0.101MPa) 1mol 体积天然气的质量,定义为天然气的“视相对分子质量”或“平均相对分子质量”。根据 Kay 混合规则:

$$M_g = \sum_{i=1}^k y_i M_i \quad (1-7)$$

式中 M_g ——天然气的视相对分子质量, g/mol ;

y_i ——天然气组分 i 的摩尔分数;

M_i ——天然气组分 i 的相对分子质量, g/mol 。

3) 天然气的相对密度

天然气的相对密度定义为,在标准状态下,天然气密度与干燥空气密度的比值,即:

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_a} \quad (1-8)$$

式中 γ_g ——天然气的相对密度;

ρ_g ——天然气的密度, kg/m^3 ;

ρ_a ——干燥空气的密度, kg/m^3 。

如果将天然气和干燥空气视为理想气体,天然气的相对密度为:

$$\gamma_g = \frac{M_g}{M_a} = \frac{M_g}{28.97} \approx \frac{M_g}{29} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明,天然气的相对密度与其相对分子质量成正比。

天然气的相对密度一般在 $0.5 \sim 0.8$ 之间,个别含重烃或其他组分多者可能大于 1。

2. 天然气的状态方程

气体的状态方程是描述一定质量的气体压力、温度和体积之间关系的表达式。

理想气体是指分子本身体积及分子之间作用力均可忽略的气体,理想气体状态方程为:

$$pV = nRT \quad (1-10)$$

式中 p ——气体的压力,MPa;
 V ——气体的体积, m^3 ;
 n ——气体的摩尔数,kmol;
 R ——通用气体常数, $R=0.008314\text{MPa}\cdot m^3/(\text{kmol}\cdot K)$;
 T ——气体的温度,K。

理想气体的状态方程仅适用于低压下的实际气体。为满足工程计算要求,目前在石油工程中广泛应用压缩因子状态方程。压缩因子状态方程的实质是引入压缩因子,修正理想气体状态方程,即:

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

式中 Z 即压缩因子,其物理意义为,在给定温度和压力条件下,实际气体所占的体积与理想气体占有的体积之比,即:

$$Z = \frac{V_{\text{实际}}}{V_{\text{理想}}} \quad (1-12)$$

压缩因子反映了实际气体相对于理想气体压缩的难易程度。当 $Z=1$ 时,实际气体相当于理想气体;当 $Z<1$ 时,实际气体比理想气体易于压缩;当 $Z>1$ 时,实际气体比理想气体难于压缩。

3. 天然气的等温压缩系数

气体的等温压缩系数定义为在等温条件下,单位体积气体随压力变化的体积变化率:

$$C_g = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1-13)$$

式中 C_g ——气体的等温压缩系数, MPa^{-1} ;
 V ——气体体积, m^3 ;
 $\left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$ ——温度为 T 时气体体积随压力的变化率, m^3/MPa 。

式(1-13)中的负号是由于气体体积随压力增加而减小,求导项为负值,为了保证压缩系数为正值而加上的。

对于一定质量理想状态的气体,由 $pV=nRT$,求导得:

$$C_g = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = -\frac{p}{ZnRT} \left[\frac{nRT}{p^2} \left(p \frac{\partial Z}{\partial p} - Z \right) \right] = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p} \quad (1-14)$$

4. 天然气的体积系数

油气开采工艺和油气集输设计中常常遇到气体状态换算,如油气藏条件下与地面标准状态下气体体积的换算、地面标准状态下的气体流速换算成某一压力温度下输气管道内气体流速等。

体积系数 B_g 定义为地面标准状态下单位体积天然气在地层条件下的体积,其数学表达式为: