

国外油气勘探开发新进展丛书 (一)

GUO WAI YOU QI KAN TAN KAI FA XIN JIN ZHAN CONG SHU

Reservoir Engineering Handbook

油藏工程手册

Reservoir Engineering HANDBOOK

- 油田注水开发综合管理
- 油藏增产措施(第三版)
- 油藏工程手册
- 油气圈闭勘探
- 储层表征新进展

石油工业出版社

塔雷克·艾哈迈德 著
冉新权 何江川 译

国外油气勘探开发新进展丛书(一)

油 藏 工 程 手 册

[美] 塔雷克·艾哈迈德 著

冉新权 何江川 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要论述油气藏的岩石物理性质、流体物性参数、实验分析方法、油气水分布及渗流规律、油气藏开采机理、油气井生产动态、油气藏开发动态预测原理和分析等方法。内容新颖、丰富,实用性强,每章之后配有习题,便于学习。

本书可供从事油气田开发工作的有关技术人员学习和参考,也可作为石油高等院校有关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油藏工程手册/[美]艾哈迈德(Ahmed, T.)著;冉新权,何江川译.
北京:石油工业出版社,2002.3

(国外油气勘探开发新进展丛书;1)

书名原文:Reservoir Engineering Handbook

ISBN 7-5021-3700-9

I. 油…

II. ①艾…②冉…③何…

III. 油田开发-手册

IV. TE34-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 010900 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)

北京乘设伟业科技排版中心排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 34.75 印张 886 千字 印 1—1000

2002 年 3 月北京第 1 版 2002 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3700-9/TE·2711

定价:110.00 元

“国外油气勘探开发新进展丛书”

编 委 会

主 任：罗英俊

副 主 任：刘宝和 闫存章 赵政璋 魏宜清

编 委：赵化昆 邓隆武 吴 奇 李海平

张正卿 吴国干 闫世信 岳登台

冉新权 刘德来 王元基 赵帮六

张卫国 周家尧 张仲宏

“石油勘探”译者代序

中国石油天然气股份有限公司上市以来,油气勘探、生产取得了很大的成绩,为股份公司的发展和价值提升做出了重大贡献。同时,我们应该清醒地看到,现在面临的勘探开发对象越来越复杂,工作难度越来越大,要进一步控制投资和降低成本,实现新的发展,必须在依靠科技进步上做文章;要坚持解放思想,实事求是,用创新思维指导油气田勘探开发工作;不断吸收国外先进的勘探开发技术,为我所用,以提高股份公司整体科技水平。

为了及时了解和跟踪国外油气勘探开发的新理论、新技术、新工艺,提高中国石油天然气股份有限公司油气勘探与生产的理论和技术水平,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司自2001年以来,组织了油气田勘探、开发方面的专家,对国外油气勘探开发方面的新技术、新理论、新成果进行调研。计划用5年左右的时间,以丛书出版的形式,系统地介绍国外油气田勘探与生产方面的理论和技术水平,以期能达到促进生产、更新知识、提高业务水平及技术水平的效果。

经过筛选,第一批翻译出版了国外最近出版的5本专著,即《油藏工程手册》、《油藏增产措施》(第三版)、《油田注水开发综合管理》、《油气圈闭勘探》、《储层表征新进展》。这5本书都是国外最新出版的权威著作,从不同的方面系统地论述了油气田勘探开发的前沿技术及发展方向,从不同的角度反应了国外油气田勘探与生产方面的现有水平和技术发展趋势。

在这套丛书的出版过程中,中国石油天然气股份有限公司有关部门和研究院所的技术人员,以及石油工业出版社做了许多工作。希望大家认认真真读好这套丛书,同时在实践中应用之,这将会对今后的工作起到一定的指导和推动作用,为搞好油田勘探开发,实施低成本战略,创造更大效益做出贡献。

羅英俊

2001年10月

译者前言

油气藏工程是油气田开发领域的一门重要学科,油气藏工程方法的研究和应用贯穿于油气田开发的整个过程。油气藏工程研究是制定油气田开发方案的基础。因此,油气藏工程一直是石油天然气行业中技术研究的重要领域。国内外已出版了不少有关油气藏工程研究方面的专著,随着油气藏工程研究的理论、方法不断深入和完善,新的研究和应用成果层出不穷,使油气藏工程这门学科不断地得到发展和丰富。

Tarek Ahmed 是油气藏工程资深专家,《Reservoir Engineering Handbook》是他 2000 年出版的著作。全书共分十三章,第一章到第三章主要论述储层流体性质及其相关参数的确定原理和方法,第四章论述储层物理特性及其相关参数的确定原理和方法,第五章、第六章论述油气水在储层中的分布及渗流规律,第七章到第十章论述油气井生产动态、气水锥进的预测和分析方法,第十一章论述油气藏的开采机理和物质平衡方程的应用,第十二章论述油藏开发动态的预测和分析方法,第十三章论述气藏开发动态的预测和分析方法。

本书与已经出版的油气藏工程专著相比,主要侧重于油气藏工程方法的实际应用。作者把油气藏工程领域的最新研究和应用成果进行了归纳、总结和分类,结合油气藏开采实例,论述了主要分析方法的基本原理、应用条件和范围。本书以手册的形式进行编写,给出了大量的应用实例,并且在每章之后还附有习题和参考文献,实用性很强,对从事油气田开发的有关技术人员有较高的参考价值。

为了进一步提高我国油气田开发的理论和技术水平,及时了解和跟踪国外油气田开发新技术的应用现状,特将《Reservoir Engineering Handbook》一书译成中文,供我国从事油气田开发工作的有关技术人员学习和参考。本书第一章到第六章由冉新权同志翻译,第七章到第十三章由何江川同志翻译,全书由冉新权同志负责审校。谭健、杨炳秀、余忠仁等同志也做了很多工作,在此一并表示感谢。

本书出版过程中得到了中国石油天然气股份有限公司副总裁、中国石油勘探与生产分公司总经理刘宝和和中国石油勘探与生产分公司副总经理闫存章的大力支持,张正卿、刘德来、张仲宏做了大量的组织工作。

由于译者水平有限,本书在翻译过程中难免存在一些缺点和不足,恳请读者批评指正。

译者

2002 年 1 月

版 权 声 明

本书英文版书名为 Reservoir Engineering Handbook© Gulf Publishing Company 2000.

本书中文版由 Gulf Publishing Company 授权翻译出版, 中文版权归石油工业出版社所有, 侵权必究。

图字 01-2001-4650 号

中 国

2002 年 1 月

目 录

第一章 储层流体特性的基本规律	(1)
第一节 储层及储层流体的划分	(1)
习题	(18)
参考文献	(19)
第二章 储层流体性质	(20)
第一节 天然气的性质	(20)
第二节 理想气体特征	(20)
第三节 真实气体特征	(25)
第四节 非烃组分对 z 因子的影响	(30)
第五节 对高分子量气体的修正	(32)
第六节 压缩因子的直接算法	(35)
第七节 天然气压缩系数	(38)
第八节 气体地层体积系数	(42)
第九节 气体粘度	(43)
第十节 天然气粘度计算方法	(44)
第十一节 原油体系的性质	(47)
第十二节 计算原油粘度的方法	(69)
第十三节 计算饱和原油粘度的方法	(70)
第十四节 计算未饱和原油粘度的方法	(71)
第十五节 地层水性质	(75)
习题	(77)
参考文献	(82)
第三章 油藏流体的实验室分析	(84)
第一节 油藏流体的组成	(84)
第二节 等组分膨胀实验	(86)
第三节 差异分离(蒸发)实验	(92)
第四节 分离器实验	(96)
第五节 油藏流体数据的校正	(102)
第六节 凝析气系统的实验室分析	(106)
习题	(115)
参考文献	(117)
第四章 岩石物性基础	(118)
第一节 孔隙度	(118)

第二节	饱和度	(121)
第三节	湿润性	(124)
第四节	表面与界面张力	(124)
第五节	毛管压力	(126)
第六节	渗透率	(142)
第七节	岩石压缩性	(158)
第八节	产层有效厚度	(162)
第九节	储层的非均质性	(162)
第十节	平面非均质性	(171)
	习题	(174)
	参考文献	(178)
第五章	相对渗透率	(179)
第一节	两相相对渗透率	(179)
第二节	相对渗透率比值	(191)
第三节	动力拟相对渗透率	(192)
第四节	相对渗透率数据的标准化和平均处理	(193)
第五节	三相相对渗透率	(198)
	习题	(203)
	参考文献	(204)
第六章	油藏流体流动基础	(206)
第一节	流体类型	(206)
第二节	流动状态	(208)
第三节	油藏几何形状	(210)
第四节	流体流动方程	(212)
第五节	稳定流	(214)
第六节	不稳定流动	(233)
第七节	恒定边界压力解	(239)
第八节	恒定边界流量解	(240)
第九节	拟稳定流	(258)
第十节	叠加原理	(275)
第十一节	不稳定试井	(282)
	习题	(295)
	参考文献	(299)
第七章	油井动态分析	(301)
第一节	直井生产动态	(301)
第二节	水平井生产动态	(326)
	习题	(334)
	参考文献	(336)

第八章 气井生产动态	(337)
第一节 直井生产动态	(337)
第二节 水平气井生产动态	(355)
习题	(357)
参考文献	(358)
第九章 气和水的锥进	(359)
第一节 锥进	(359)
第二节 直井的锥进问题	(361)
第三节 直井锥进突破时间	(381)
第四节 锥进突破后的油井动态	(383)
第五节 水平井中的锥进	(389)
第六节 水平井突破时间	(393)
习题	(399)
参考文献	(400)
第十章 水侵	(402)
第一节 水层的分类	(402)
第二节 天然水侵的识别	(405)
第三节 水侵模型	(405)
习题	(457)
参考文献	(460)
第十一章 原油开采机理和物质平衡方程	(461)
第一节 一次采油机理	(461)
第二节 物质平衡方程	(472)
习题	(497)
参考文献	(500)
第十二章 油藏动态预测	(501)
第一节 油藏动态预测方法	(501)
第二节 随时间变化的油藏动态	(524)
习题	(525)
参考文献	(526)
第十三章 天然气藏	(527)
第一节 容积法	(527)
第二节 物质平衡法	(529)
第三节 线性物质平衡方程	(535)
第四节 异常压力天然气藏	(539)
习题	(542)
参考文献	(544)
关于作者	(545)

第一章 储层流体特性的基本规律

在油藏中发现的天然烃类系统是有机化合物的混合物,这些有机化合物的混合物在较宽的温度和压力范围内表现出多相特性。这些烃类混合物以气态、液态或固态的形式存在,或以它们的各种混合物形式存在。

由于流体相态特性的不同,以及储层岩石的物理性质各异(储层岩石的物理性质决定气体和液体运移或滞留的相对难易程度),从而形成了具有复杂特性的各种不同类型的油藏。通常,石油工程师们的任务是通过研究石油储层流体特性及油藏特征,来确定利润最大化的开发生产流程和方法。

本章旨在回顾储层流体相态特性的基本规律,并描述怎样使用相图来划分储层和天然烃类系统。

第一节 储层及储层流体的划分

石油储层从广义上可划分为油藏和气藏,根据以下三个方面还可以进一步划分:

- (1)储层烃类混合物的组成;
- (2)储层的原始压力及温度;
- (3)地面生产时的温度和压力。

烃类的相态存在条件是一个十分重要的问题,我们可以很方便地用通常所讲的不同类型的相图来描述确定这些条件的实验方法或数学方法,下面所讲的相图就是压力—温度图。

一、压力—温度图

图 1—1 是一种典型的多组分系统的温度—压力图。尽管不同的烃类系统可能有不同的相图,但它们的轮廓都是相似的。

这些多组分的压力—温度图常用于:

- (1)划分储层;
- (2)划分自然形成的烃类系统;
- (3)描述储层流体的相态特征。

为了全面了解温度—压力图的重要性,首先必须识别和定义相图中的几个关键词:

- (1)临界凝析温度(T_{ct}):定义为无论压力大小都没有液相存在的最高温度(图中 E 点处对应的温度),对应的压力称为临界凝析温度下的压力(p_{ct})。
- (2)临界凝析压力(p_{cb}):定义为不管温度高低都没有气相存在的最大压力(图中 D 点处对应的最高压力),对应的温度称为临界凝析压力下的温度(T_{cb})。
- (3)临界点:对多组分混合物而言,临界点是指某一特定温度和压力状态(C 点)。在这一状态下,所有的气相和液相的性质是相同的,临界点处的压力和温度分别为混合物的临界压力

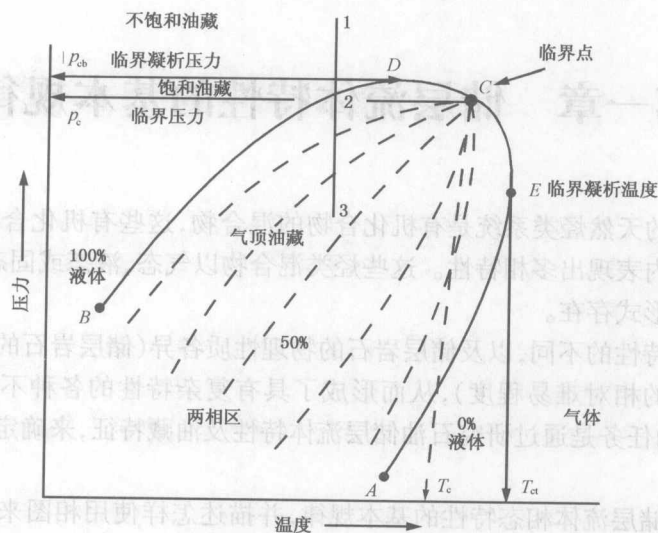


图 1—1 典型的多组分系统的温度—压力图

(p_c)和临界温度(T_c)。

(4)相包络线(两相区):被泡点线和露点线包围的区域(BCA 线),在这个区域中气体和液体以一种平衡方式共存,这个区域称为是烃类系统的相包络线。

(5)等液量线:在相图中虚线被称为等液量线,它们描述等液量时的压力温度条件,等液量线收敛于临界点(C 点)。

(6)泡点线:指液相区和两相区的分界线(BC 线)。

(7)露点线:指气相区和两相区的分界线(AC 线)。

一般来说,根据储层初始压力(p_i)和温度(T)在该储层相图上所处的位置,就能方便地进行储层划分。储层可被划分为两种基本类型,这两种类型分别是:

(1)油藏:如果储层温度 T 低于储层流体的临界温度 T_c ,则认为该储层为油藏。

(2)气藏:如果储层温度高于烃类流体的临界温度 T_c ,则认为该储层为气藏。

二、油藏

根据油藏的初始压力 p_i ,可把油藏进一步划分为以下类型:

(1)未饱和油藏:如果油藏初始压力 p_i 高于泡点压力 p_b ,则为未饱和油藏(图 1—1 中的位置点 1)。

(2)饱和油藏:如果油藏初始压力 p_i 等于泡点压力 p_b ,如图 1—1 中的位置点 2 所示,则为饱和油藏。

(3)气顶油藏:如果储层初始压力低于储层流体的泡点压力时,如图 1—1 中位置点 3 所示,则为气顶油藏或两相油藏。在这种油藏中油相在气相或蒸气相的下方。等液量线可以给出气顶体积与油相体积的比例。

原油的物理性质和化学组分变化范围很大,将它们归纳为几大类型是很重要的,一般说来,可将原油划分成以下几类:

- (1) 普通黑油;
- (2) 低收缩性原油;
- (3) 高收缩性(挥发性)原油;
- (4) 近临界原油。

以上划分主要是基于原油的性质,包括物理性质、组成、气油比、外观和压力—温度相图。

1. 普通黑油

图 1—2 是一种典型的普通黑油的压力—温度图。这种黑色原油具有等液量线大致均匀分布的特点。随着图 1—2 中压力沿垂直线 EF 下降,绘制液体体积百分比与压力的关系曲线,即图 1—3 所示的液体收缩曲线。液体收缩曲线大致为一条直线,只有在压力非常低的情况下例外。这种普通黑油的生产气油比在 $200 \sim 700 \text{ ft}^3/\text{标准 bbl}$ 之间,油的重量为 $15 \sim 40^\circ \text{API}$,地面脱气原油的颜色为棕色或深绿色。

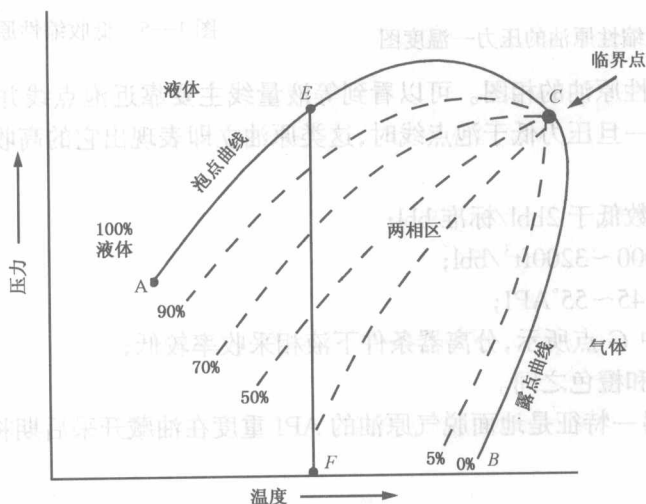


图 1—2 典型的普通黑油的压力—温度图

2. 低收缩性原油

图 1—4 是一种典型的低收缩性原油的压力—温度图,这种相图的特征是等液量线靠近露点线附近。图 1—5 中的液体收缩曲线显示了这类原油的收缩特性。这类原油的其他特性还有:

- (1) 地层体积系数低于 $1.2 \text{ bbl}/\text{标准 bbl}$;
- (2) 气油比低于 $200 \text{ ft}^3/\text{bbl}$;
- (3) 原油重度低于 35°API ;
- (4) 颜色为黑色或深色;
- (5) 图 1—4 中的标为 85% 的等液量线上的 G 点表明在分离器条件下液相采收率高。

3. 挥发性原油

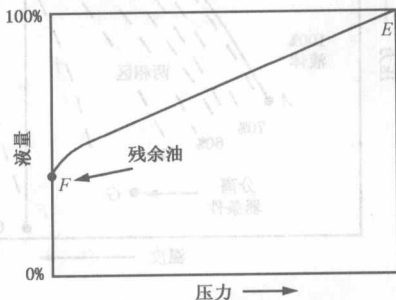


图 1—3 液体收缩曲线

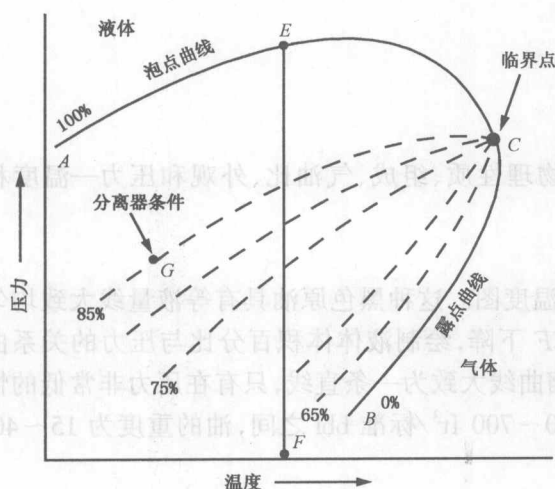


图 1—4 低收缩性原油的压力—温度图

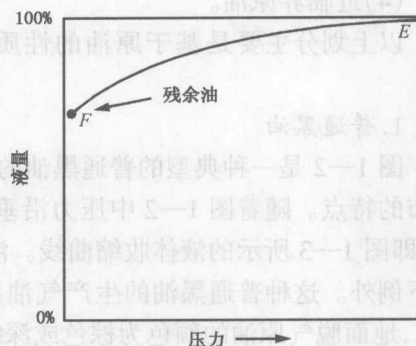


图 1—5 低收缩性原油的液体收缩曲线

图 1—6 是挥发性原油的相图。可以看到等液量线主要靠近泡点线并分布在较低的压力区间。图 1—7 说明一旦压力低于泡点线时,这类原油立即表现出它的高收缩性。该类原油的其他特性还有:

- (1) 地层体积系数低于 2bbl/标准 bbl;
- (2) 气油比为 2000~3200ft³/bbl;
- (3) 原油重度为 45~55°API;
- (4) 如图 1—6 中 G 点所示,分离器条件下液相采收率较低;
- (5) 颜色在绿色和橙色之间。

挥发性油藏的另一特征是地面脱气原油的 API 重度在油藏开采后期将上升。

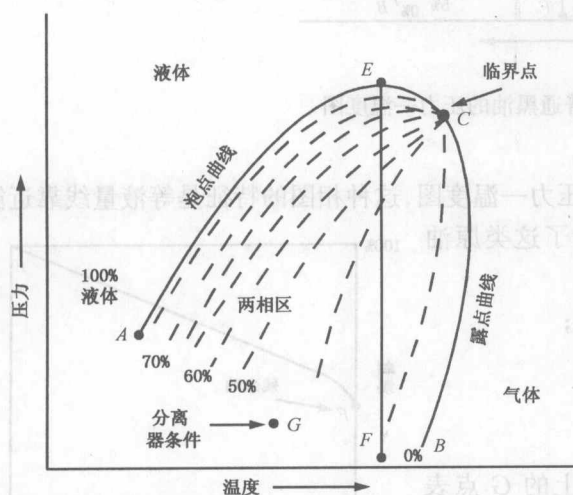


图 1—6 挥发性原油的相图

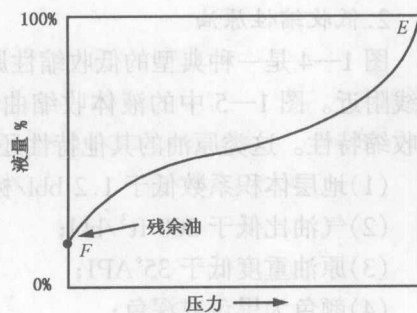


图 1—7 挥发性原油的典型液体收缩曲线

4. 近临界点原油

如图 1—8 所示,如果储层温度 T 接近烃类系统的临界温度 T_c ,这种烃类混合物称为近临界点原油,因为所有的等量液线都收敛于临界点,等温压降(图 1—8 中的垂直线 EF)可使原油在泡点压力时 100% 的烃类孔隙体积收缩到低于泡点压力 10~50 psi 时的 55% 或更少。图 1—9 显示了近临界点原油的收缩特性。近临界点原油具有以下特性:

- (1) 3000ft³/bbl 或更高的气油比;
 - (2) 2.0bbl/标准 bbl 或更高的地层体积系数。
- 近临界点原油的组成特征通常有:
- (1) 液烃组分(即庚烷以上的组分)摩尔分数占 12.15%~20%;
 - (2) 轻烃组分(乙烷至己烷)摩尔分数占 35% 甚至更多;
 - (3) 其余组分为甲烷。

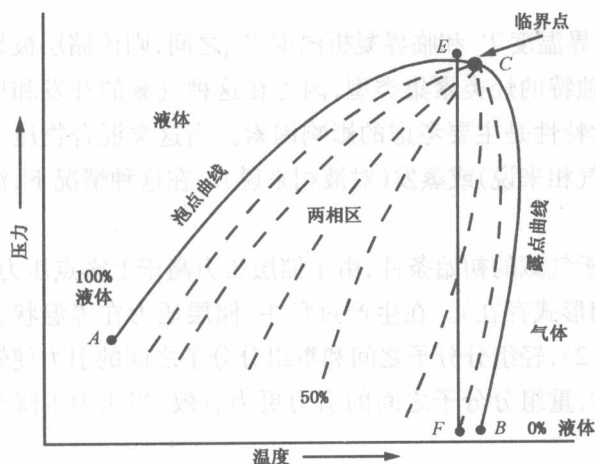


图 1—8 近临界点原油相图示意图

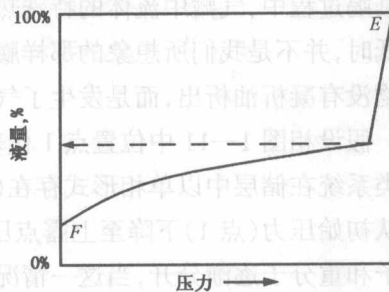


图 1—9 典型的近临界点原油液相收缩曲线

图 1—10 对每类原油的收缩曲线的特征形状进行了比较。

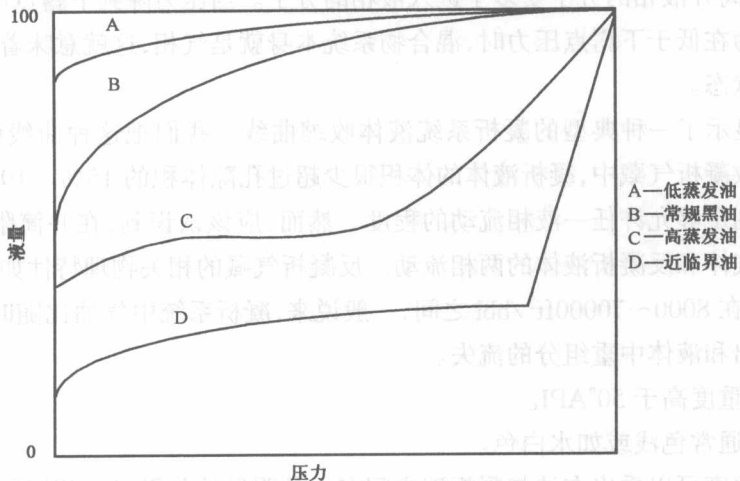


图 1—10 原油体系液相收缩线

三、气藏

一般说来,如果储层温度高于烃类系统的临界温度,该储层则为天然气藏。根据气藏的相图及储层条件的不同,可把天然气藏划分为4种类型:

- (1)反凝析气藏;
- (2)近临界凝析气藏;
- (3)湿气藏;
- (4)干气藏。

四、反凝析气藏

如果储层温度 T 位于该储层流体的临界温度 T_c 和临界凝析温度 T_{ct} 之间,则该储层被划分为反凝析气藏。这种类型的气藏是一种独特的烃类聚集类型,因为在这种气藏的开发和压力衰竭过程中,气藏中流体的特殊热力学特性是主要考虑的影响因素。当这类混合物压力降低时,并不是我们所想象的那样膨胀(对气相来说)或蒸发(对液相来说)。在这种情况下,混合物没有凝析油析出,而是发生了气化。

假设相图 1—11 中位置点 1 代表反凝析气藏的初始条件,由于储层压力高于上露点压力,烃类系统在储层中以单相形式存在(即气相形式存在)。在生产过程中,储层压力在等温状态下从初始压力(点 1)下降至上露点压力(点 2),轻组分分子之间和重组分分子之间的引力使轻分子和重分子逐渐分开,当这一情况发生时,重组分分子之间的引力更为有效,当压力下降至上露点压力时,液体开始析出。

随着压力不断降低,反凝析过程继续进行,一直到液体析出量达到最大值(即位置点 3)。如果压力进一步减小,重分子就开始正常气化过程。在这个过程中,撞击液面的气体分子越来越少,从而引起离开液相的分子要多于进入液相的分子。当压力降到下露点压力时,气化过程不再进行。因为在低于下露点压力时,混合物系统本身就是气相,这就意味着系统中的液体必然已处于气化状态。

图 1—12 显示了一种典型的凝析系统液体收缩曲线。我们把这种曲线称为液体析出曲线。在绝大多数凝析气藏中,凝析液体的体积很少超过孔隙体积的 15%~19%。这种液体的饱和度没有达到足够允许任一液相流动的程度。然而,应该认识到,在井筒附近压降高,大量析出液体导致气体和反凝析液体的两相流动。反凝析气藏的相关物理特性如下:

(1)气油比在 8000~70000 ft^3/bbl 之间,一般说来,凝析系统中气油比随时间增大,主要是由于液体的析出和液体中重组分的流失。

(2)凝析油重度高于 50°API。

(3)凝析油通常色浅或如水白色。

从组分的角度可以看出在油与凝析液之间有一条明显的分界线。若储层流体中含有庚烷且其重组分摩尔浓度大于 12.5% 时,流体几乎在储层中总处于液体状态。据观测,原油中液

态烃组分庚烷和重组分含量最低为 10%，凝析液最高可达 15.5%。这种情况很少，除非它们有很高的 API 值。

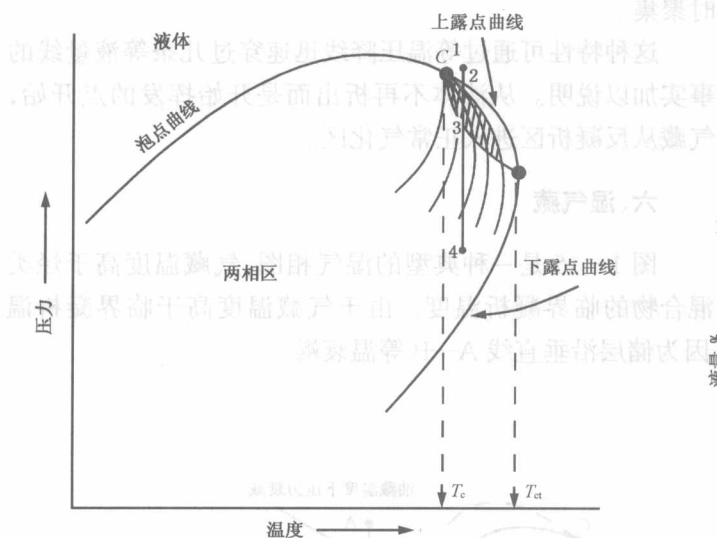


图 1—11 反凝析体系的典型相图

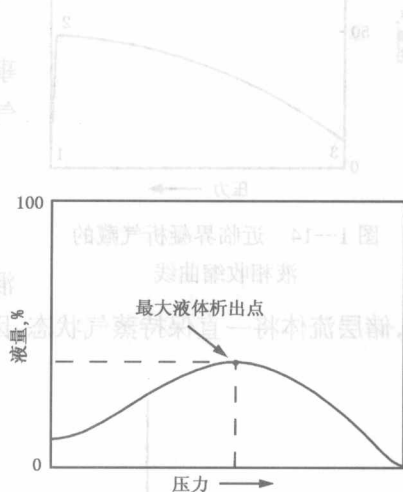


图 1—12 典型的凝析系统液体收缩曲线

五、近临界凝析气藏

如果储层温度接近临界温度，如图 1—13 所示，则储层中的烃类混合物为近临界凝析气。描述这种类型的天然气的体积动态是通过图 1—13 中的等温压降及图 1—14 中相对应的液体

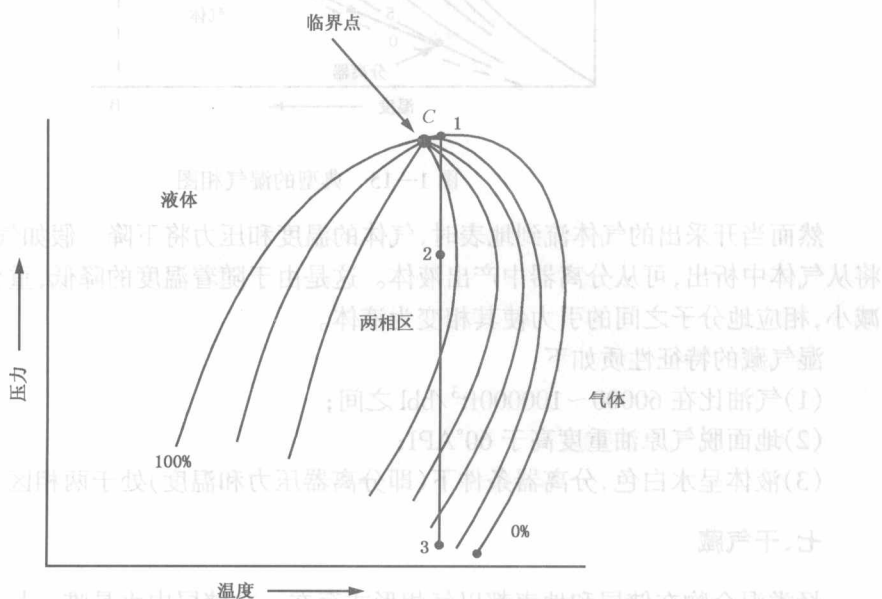


图 1—13 近临界凝析气藏的典型相图