



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



石油工程概论

第2版

王瑞和 李明忠 主编



中国石油大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油工程概论

(第2版)

王瑞和 李明忠 主编

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

石油工程概论/王瑞和,李明忠主编. —2版. —东营:
中国石油大学出版社,2011.5
ISBN 978-7-5636-3476-7

I. ①石… II. ①王… ②李… III. ①石油工程—高
等学校—教材 IV. ①TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 069602 号

书 名:石油工程概论
作 者:王瑞和 李明忠

责任编辑:穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计:九天设计

出版者:中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印刷者:沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532,0546—8392563)

开 本: 180×235 印张:16.25 字数:312千字

版 次: 2011年5月第2版第1次印刷

定 价: 24.00元



Preface

前言

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,由2001年出版的同名教材修订而成。它是石油工程专业学生在学习专业课程之前了解本专业领域工程背景和知识体系的教材,也是石油院校其他相关专业学生学习石油工程专业知识的教材。初版教材是根据石油高等教育改革要求并为满足石油工程专业人才培养的需要而编写的,目前已经过10年应用、5次再版,印数达15 500册,虽收效良好,但其内容的老化现象亦显见。本次修订的重点是结合近年来石油工程技术的发展,并参考教师们的使用意见,调整了部分章节的内容和知识结构,更新了部分内容。修订后,教材的体系更加完整,内容更加新颖,对相关知识的介绍也更趋广普化。

本教材以石油开发、生产的工艺过程为主线,全面系统地介绍了石油工程的基本知识、原理及相关的工艺技术。全书共分十二章,内容包括:绪论,油藏流体的物理性质,油藏岩石的物理性质,油田开发设计基础,油藏动态分析和开发调整,油气钻井方法及工艺,钻进工艺技术,固井、完井与试油,采油方法,注水工程,油水井增产增注技术,提高采收率原理等。教学使用过程中,授课教师可根据专业教学的具体要求而有所取舍。

本教材由中国石油大学(华东)石油工程学院的部分教师共同编写。第一章、第六章、第七章、第八章由王瑞和教授编写;第二章、第三章、第九章由李明忠教授编写;第四章、第五章由张艳玉教授编写;第十章、第十一章、第十二章由于乐香副教授编写。全书由王瑞和、李明忠统稿。

由于石油工程技术本身正在快速发展,而且我国的石油高等教育改革也在不断深化,加之本教材面向的专业多,教材内容的科学组织实有困难。同时,由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,热诚希望广大师生提出宝贵意见。

编者

2011年2月



第一章 绪论	1
第二章 油藏流体的物理性质	6
第一节 油气的化学组成	6
第二节 油气的相态	8
第三节 地层原油的高压物性	9
第四节 天然气的高压物性	14
第五节 地层水的高压物性	15
思考题	17
第三章 油藏岩石的物理性质	19
第一节 油藏岩石的孔隙度和流体的饱和度	19
第二节 油藏岩石的压缩系数	23
第三节 油藏岩石的渗透率	24
第四节 油藏岩石的润湿性和油水的微观分布	29
思考题	32
第四章 油田开发设计基础	33
第一节 油田勘探开发程序	33
第二节 储量计算	37
第三节 油藏驱动方式及其开采特征	39
第四节 油田开发层系的划分与组合	43

第五节 砂岩油田的注水开发	45
第六节 油田开发方案的编制	49
第七节 复杂断块油田开发	50
思考题	53
第五章 油藏动态分析和开发调整	55
第一节 试井分析方法	55
第二节 经验方法	67
第三节 物质平衡方法	75
第四节 油藏数值模拟方法	82
第五节 油田开发调整	85
思考题	88
第六章 油气钻井方法及工艺	89
第一节 钻井方法	89
第二节 钻井类型	92
第三节 钻井设备	93
第四节 钻井工具	97
第五节 基本钻井工艺过程	105
思考题	108
第七章 钻进工艺技术	110
第一节 影响钻进的主要因素	110
第二节 钻进参数选择	114
第三节 井斜及控制	117
第四节 洗井与洗井液	120
第五节 特殊钻井工艺技术	124
思考题	140
第八章 固井、完井与试油	142
第一节 固井	142
第二节 油气井完成	150
第三节 试油投产	158
第四节 中途测试	165
思考题	167



第九章 采油方法	168
第一节 自喷采油	168
第二节 气举采油	175
第三节 有杆泵采油	179
第四节 潜油电泵采油	186
第五节 螺杆泵采油	189
第六节 水力泵采油	192
思考题	196
第十章 注水工程	197
第一节 水源、水质及注水系统	197
第二节 注水井吸水能力及分析	201
第三节 分层注水技术	205
思考题	209
第十一章 油水井增产增注技术	210
第一节 水力压裂技术	210
第二节 油层酸化工艺技术	215
第三节 高能气体压裂技术	217
第四节 物理法增产增注技术	221
思考题	226
第十二章 提高采收率原理	227
第一节 采收率及其影响因素	227
第二节 提高采收率的基本方法	231
思考题	248
参考文献	249



第一章 绪论

石油工程是根据油气和储层特性建立适宜的流动通道并优选举升方法,经济有效地将地下油气从油气藏中开采到地面所实施的一系列工程和工艺技术的总称。按目前我国石油生产的专业和管理的门类划分,石油工程领域覆盖了油藏工程、钻井工程和采油工程三个相互独立又相互衔接的工程领域。也就是说,石油工程是一个集多种学科、多种工艺技术和工程措施于一体的多种工艺技术相互衔接、相互渗透、相互促进和发展的综合工程。

一、石油工程的主要内容

随着世界范围内对石油、天然气需求的加剧,对石油和天然气生产的重视及石油工程技术的发展,目前已经形成了针对各种类型油气田的生产开发体系和完整的工艺技术。而且随着越来越多的油气田投入大规模的开发,开发的难度也越来越大,从而又推动了石油工程技术的迅速发展,使之成为一门高度综合的工程技术。

众所周知,石油和天然气大都是深埋于地下几百米、几千米甚至更深的液、气矿物资源,具有较强的隐蔽性,它们不像普通固体矿物那样可以由人工直接采掘。所以要成功地开发油气资源,首先要对油气田地质资料进行深入细致的研究,准确掌握地下油气的分布状况,储油气层的性质、构造形态及特点,油气储量等,提供制定合理的开发方案和合理开采方法的依据。像任何一项工程在施工前必须有一个合理的施工方案一样,要开发好一个油气田,也必须制定一个正确合理的开发方案。以弄清的油气田地质资料为基础,对油气层进行分类排队,选定油田开发方式;根据地下油气藏的结构和压力特点,选择合理的布井方式,确定保持生产层能量的方法和技术措施,这就是油藏工程的主要内容。

在合理制定出开发方案之后,还需要一套科学的钻井方法和先进的钻进工艺技术,使钻井过程质优、速快、成本低,以建立起一条开采油气的永久性通道,满足油田长期生产的要求。在钻井过程中要最大限度地保护好油气层,以保证实现钻井是为了开采油气的最终目的。

当油气流的通道建成以后,必须采用科学先进的采油工艺技术和方法,以最小的代价、合理的速度将油气开采到地面,并要随时了解和掌握地下油气水运动的状态和规模,随时对油气田的开采动态进行监测和分析,调整、完善开采技术和措施,保持长期稳产、高产,从而实现开发方案中的各项指标和较高的经济效益。

石油工程的直接目的是以最小的代价最大限度地开采地下油气资源,为国民经济服务。衡量油气开采技术水平的一个重要指标是油气采收率,它是指从油气藏中开采出来的油气总量与其地质储量的百分比。目前世界上已开发的油气田中,采收率高的已超过70%,低的甚至不足10%。我国东部的各大油田的平均采收率在30%左右,也就是说尚有2/3的原油滞留在地下而没有被开采出来。这是多么巨大的待开发的油气资源!尤其是在近年来新探明储量不足的情况下,提高油气采收率已成为一项十分重要的技术、经济课题,也是石油工程中一项极其重要的任务。

总之,石油工程涵盖了石油开发生产的全过程,并交叉涉及油气勘探的一些基本内容。其主要任务是对一个经过初步勘探发现具有工业油气流的含油气构造进行详探和必要的生产性开发试验,在基本证实油气储量并掌握了油气藏地质特征以后,制定合理的开发方案,优选井网布置,进行合理的钻井设计和科学的钻井施工,选配合理高效的采油工艺技术,并随着开发过程的不断深入,随时对油气藏进行动态管理,调整、补充和完善开发方案,采取有效的驱油、增产措施,最大限度地提高原油采收率。石油工程从生产程序上可归结为以下8项内容:

- (1) 对油气田进行详探及生产性开发试验;
- (2) 编制合理的油气田开发方案;
- (3) 钻井,建立起永久性的油气流开采通道;
- (4) 采用合理的开采工艺技术,使油气从地下流出地面;
- (5) 将油气从井口输送到相应的站点;
- (6) 随时进行地下油气藏的动态监测分析;
- (7) 调整和完善油气田的开发方案;
- (8) 采用各种有效的增产增注措施,并最大限度地提高油气采收率。

二、油气藏的形成与类型

石油工程的直接研究对象是油气的储集地——油气藏。油气藏通常被定义为油气在单一圈闭中的聚集。也就是说,一定数量运移着的油气,由于遮挡物的作用,它们的运移受到阻止,因而在储集层聚集起来,这就形成了油气藏。因此,要想科学地打开并合理地开发油气藏,就需要首先对油气的生成、运移、储集过程及油气藏形成的条件和规律有一个基本的了解。



1. 石油的生成

关于石油的生成,长期以来存在着有机生成和无机生成两种不同的学说,但大部分专家同意有机生成学说。有机生成学说认为,现代埋藏于地下的石油是古代生物的遗骸在浅海、海湾、内陆湖泊等地沉积下来,并被新的沉积物迅速埋藏起来,使这些有机物质不被氧化而保存下来。随着上部沉积物的不断增厚,温度和压力的升高,有机物质便在一一定的温度、压力条件和特殊的环境下,经过复杂的物理化学变化,最后转变成石油和天然气。

2. 油气藏的形成

石油是在生油层中生成的,所以形成油气藏必须首先有生油气层。一般认为,生油气层是那些较厚的暗色粘土质和石灰质岩层。这种岩层比较致密,生成的油气也比较分散,所以很难形成有开采价值的油层。

油气是可以流动的。在共存水的重力分异和一定压力的作用下,油气流出生油层,被运移到别的地层——储油层——中去。储油层具有大量的空隙空间,可以容纳较多的油气,形成油气聚集。疏松的多孔砂岩、具有裂缝和溶洞的石灰岩等,都是很好的储油层。

石油储集到储油层以后,如果储油层的上面覆盖的地层属于多孔、渗透性地层,或有裂缝、溶洞,或者上面没有致密地层覆盖,那么油气就会跑出地面或流失到其他地层中去,这样就形不成油气藏。所以形成油气藏还需在储油层上部有致密的盖层。盖层一般是致密的粘土层、泥岩、页岩层。

除了覆盖油层保护油气不跑出地面以外,还要使储油层的油气不向四周方向运移而被分散掉,这就需要有一定的圈闭条件,使储油层成为一个封闭系统。

综上所述,油气藏形成的过程可以概括为:石油生成—运移—聚集—保存。油气藏形成的条件可归结为四个必要条件,即有生油层、储油层、盖层和保护层,简称为生、储、盖、保四要素。

3. 油气藏的类型

如上所述,油气藏的形成需要一定的圈闭条件,形成一个封闭系统。在沉积地层中,这种圈闭有多种类型。按照圈闭条件的不同,可以将之分为以下几种主要类型。

(1) 背斜构造油气藏。如图 1-1 所示,它是以背斜构造为圈闭条件的油气藏。这种油气藏的气、油、水按照密度不同自上而下分布,油气层的上部有渗透性很低的盖层保护。

(2) 断层遮挡油气藏。断层遮挡油气藏也称为断层封闭油气藏,如图 1-2 所示。它以断层面作为圈闭条件,当石油运移到储油层后,碰到不渗透的断层面,受到遮挡而被圈闭起来。

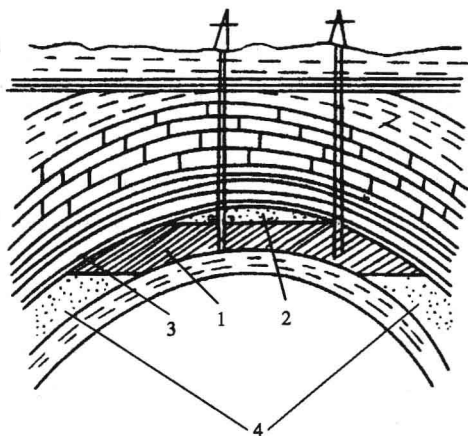


图 1-1 背斜构造油气藏

1—石油;2—气顶;3—盖层;4—边水

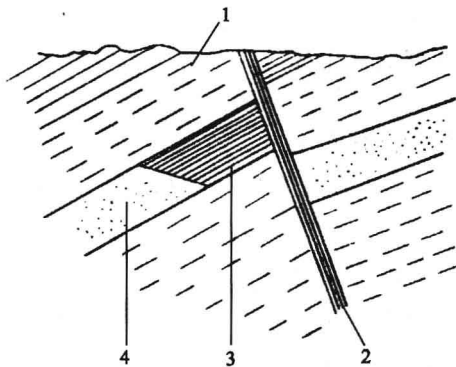
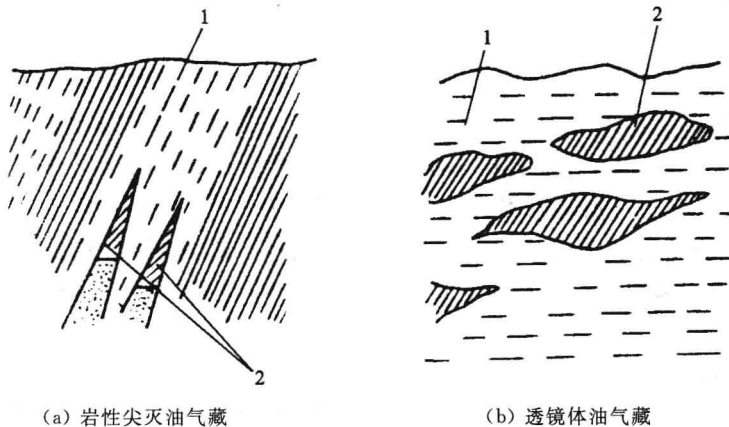


图 1-2 断层遮挡油气藏

1—盖层;2—断层面;3—石油;4—水

(3) 岩性油气藏。在岩层的沉积过程中,由于岩性变化而形成了不渗透性岩层的遮挡,从而造成圈闭,油气储集在渗透性地层中成为油气藏,如图 1-3 所示。



(a) 岩性尖灭油气藏

(b) 透镜体油气藏

图 1-3 岩性油气藏

1—不渗透地层;2—石油

常见的岩性油气藏有两种:一种是岩性尖灭油气藏(见图 1-3a),它是指渗透性地层在向上倾斜的方向逐渐减薄,最后消失,在周围不渗透性地层圈闭下形成了尖状储油气层的油气藏;另一种是砂岩透镜体油气藏(见图 1-3b),即在沉积过程中砂岩沉积成凸透镜形状,周围被不渗透性地层(如泥岩、页岩等)所包围,形成圈闭条件,而这种不渗透的地层就是生油层,油气生成后即进入砂岩透镜体中保存下来。



(4) 不整合封闭油气藏。由于地壳运动,较老的地层发生弯曲,露出地面的岩层受到风化剥蚀,并在其上沉积了新的地层,这种在老地层之间凹凸不平的接触面称为不整合面,如图 1-4 所示。这种不整合面及其上的地层对下部渗透性地层中运移的流体也会起到遮挡作用,造成圈闭,形成油气藏。

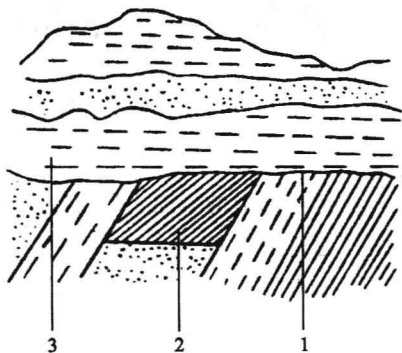


图 1-4 不整合封闭油气藏

1—不整合面;2—石油;3—不渗透地层

除此之外,还有岩丘油气藏、礁块油气藏等构造型油气藏及其他非构造型油气藏,这里不作详述。



第二章 油藏流体的物理性质

油藏流体是指存在于地下油藏岩石中的石油、石油伴生气(天然气)和地层水。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。处于地层状态(即高温高压)下的油气物理性质通常称为油气的高压物性。显然,油气的高压物性与其在地面状态(常温常压)下的性质是有很大差异的。另外,在石油开采过程中,随着温度、压力的变化,油藏流体的物理性质也会发生变化。为了达到新的平衡状态,就会出现原油脱气、原油析蜡、地层水析盐或气体溶解等相态转化现象。因此,若想高效经济地采出地下原油,必须深入了解油藏流体的物理性质。

第一节 油气的化学组成

石油和天然气是由碳和氢两种化学元素构成的称为烃的混合物。典型的油气烃类组成如表 2-1 和表 2-2 所示。

表 2-1 某一典型原油组成

组分(碳原子数)	质量分数/%	组 分	质量分数/%
汽油($C_4 \sim C_{10}$)	31	烷 烃	30
煤油($C_{11} \sim C_{12}$)	10	环烷烃	49
柴油($C_{13} \sim C_{20}$)	15	芳香烃	15
润滑油($C_{21} \sim C_{40}$)	20	沥 青	6
残渣(C_{41} 以上)	24		

从表 2-1 可以看出,石油主要由烷烃、环烷烃和芳香烃组成。烃是指只有碳和氢两种元素构成的有机化合物;烷烃是指只有碳碳单键和碳氢键的链烃;环烷烃是指含有脂环结构的饱和烃;而芳香烃则是指分子中具有苯环结构的烃。以 6 个碳原子的烃为例,它们的分子结构式分别如图 2-1 所示。



石油中除含纯烃以外,还有含少量氧、硫和氮等的化合物,如表 2-1 中的沥青即为这种化合物,石油中的脂肪酸和环烷酸亦属这类化合物。石油中常含有石蜡,它是 16 个碳原子以上的、常温下为固态的烃。

表 2-2 列举了某一典型天然气的组成。由表 2-2 中的资料可以看出,天然气主要是由碳原子数为 1~4 的烷烃构成,其中甲烷(即指由一个碳原子和四个氢原子构成的烃)占有相当大的比例。天然气据其含有甲烷的多少可分为“干气”和“湿气”。所谓干气,即指天然气的主要成分为甲烷,其含量高达 98% 左右。而湿气,则指天然气中除了含有甲烷这一主要成分(50% 以上)外,还含有一定量的汽油蒸气。湿气又称为“富气”,即富集汽油蒸气的气。干气多为气藏产气,而湿气则多是产油井的伴生气。

天然气中除纯烃以外,还含有少量非烃成分,如一氧化碳、二氧化碳、氮气和硫化氢等。

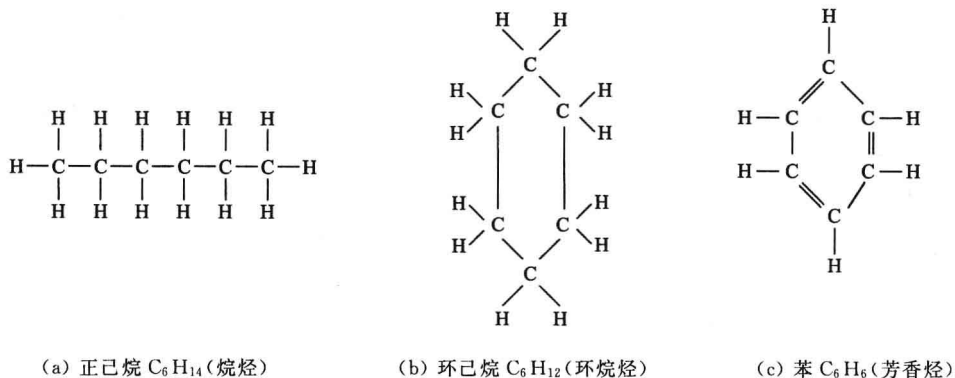


图 2-1 三种烃族的分子结构式

表 2-2 某一典型天然气组成

组 分	体积分数/%	
	天然气	油井伴生气
甲 烷	70~98	50~92
乙 烷	1~10	5~15
丙 烷	痕迹~5	2~14
丁 烷	痕迹~2	1~10
戊 烷	痕迹~1	痕迹~5
己 烷	痕迹~0.5	痕迹~3
庚烷以上	无~痕迹	无~0.5
氮	痕迹~5	
二氧化碳	痕迹~1	痕迹~4
硫化氢	偶然痕迹	无~6

第二节 油气的相态

所谓相态,是指物质在一定条件(一定温度和压力)下所处的状态。常温常压下,石油中碳原子数为1~4的烷烃为气态,碳原子数为5~16的烷烃为液态,而碳原子个数在16以上的烷烃为固态。

在地层条件下,油气可以处于单一的液相,形成低饱和原油,其油藏为低饱和油藏;也可以以单一的气相存在,形成气藏;还可以以油气两相共存,形成饱和原油,其油藏为带有气顶的饱和油藏。油气藏烃类在开采前究竟处于哪种相态,主要取决于油气的组成及油气数量上的比例以及它们所处的温度和压力条件。

油气藏烃类的相态通常用 $p-T$ 图来研究, $p-T$ 图又称相图,即表明油气相态随温度和压力变化情况的图。

油气是一个复杂的多组分烃类混合物,不同的油气藏,甚至同一个油气藏处在不同开采时期的不同温度和压力下的相图也会不同。图 2-2 是一个多组分烃类系统的相图。

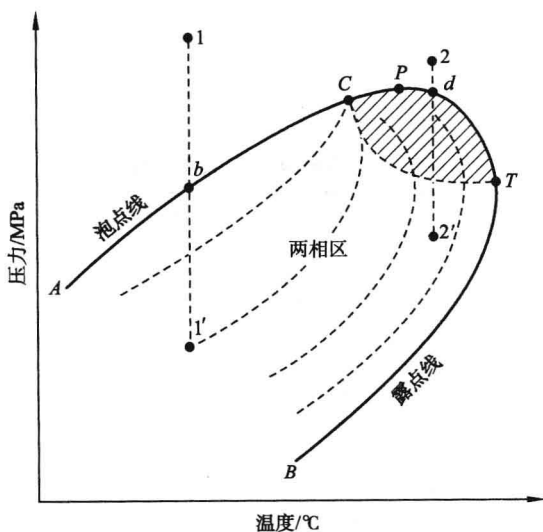


图 2-2 多组分烃类系统相图

图 2-2 中的 $ACPTB$ 曲线把图分成了三个区: AC 线以上称为液相区, BC 线以外称为气相区, 而 $ACPTB$ 线所包围的区域称为气液两相区。 AC 线称为泡点线, 它是液相区



和两相区的分界线; BC 线称为露点线,它是气相区和两相区的分界线; C 点称为临界点,它是泡点线和露点线的交汇点; P 点是两相区的最高压力点,此点压力通常称为临界凝析压力; T 点是两相区的最高温度点,此点温度通常称为临界凝析温度。

随油气藏开采压力的降低,在油气藏内或井筒中都可能出现单相油气转化为油气两相共存的过程。相态转化的同时,油气组成亦随之改变。油气的化学组成是相态转化的内因,压力和温度则是发生转化的条件。

如图 2-2 所示,处于 1 点的原油为单相的液体,若油藏温度保持不变,当开采压力不断降低,到达 b 点时,油中开始有气泡出现,压力再降低油中溶解的气便分离出来,形成气液两相共存的状态。 b 点的压力称为泡点压力或饱和压力。显然, AC 线是不同温度下的泡点压力(饱和压力)线。

同理,处于 2 点的高压气藏在一定温度下,当压力不断降低,到达 d 点时,气中有露珠出现,若压力继续下降就会有一部分气凝析成液相的油,单相的气藏转化为气液两相。显然,这是一种反常现象。具有这种现象的气藏称为凝析气藏,这种反常现象称为反凝析。图中 d 点的压力称为第二露点压力。

应该强调指出,不同组分烃类系统的相图是不同的。另外,上述泡点压力(或饱和压力)和第二露点压力(或反凝析压力)是油藏和凝析气藏开采的重要压力界限。通常,油藏的开采都尽量控制地层压力不低于饱和压力的 5%~10%,即不希望油中有过多的气分离出来;而气藏的开采一般保持井口压力在第二露点压力以上,即不希望井筒产气中凝析出油来。

第三节 地层原油的高压物性

地层油处于高温高压状态下,并溶有大量的天然气,其物性与地面原油物性有很大差别,如粘度、密度和压缩系数等都大不相同。在油藏开采过程中,随压力、温度的降低以及油中溶解气的不断释出,地层油的性质也在不断变化。因此,了解地层油物性的变化情况及其影响因素,对于分析油藏开采动态、渗流计算及开采工艺设计等都是必不可少的。

一、地层原油的溶解气油比

地层原油的物性主要受三个因素的影响,即地层温度、地层压力和原油中的溶解气量。通常,用溶解气油比这一指标来反映地层油中的溶解气量。

溶解气油比定义为:用接触脱气的方法得到的地层原油溶解气量的标准体积与地面

脱气原油的体积之比,单位为 m^3/m^3 ,用符号 R_s 表示。

(1) 显然,地层原油溶解气油比的大小和温度有关。从定义上讲,温度增加,溶解气油比增大。但从油藏所处的温度条件来讲,油藏温度越高,地层原油溶解气油比应该越小。由于油藏开采一般是等温降压过程,所以温度对溶解气油比的影响并不重要。

(2) 温度一定时,溶解气油比和压力的关系如图 2-3 所示。由图 2-3 可看出,当压力大于泡点压力 p_b 时,溶解气油比不变,而当压力低于 p_b 时,溶解气油比随压力的降低而减小。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_{s_i} 表示。由图 2-3 知,在油藏原始压力 ($p_i = 25 \text{ MPa}$) 下的原始溶解气油比与泡点压力下的溶解气油比相等。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。

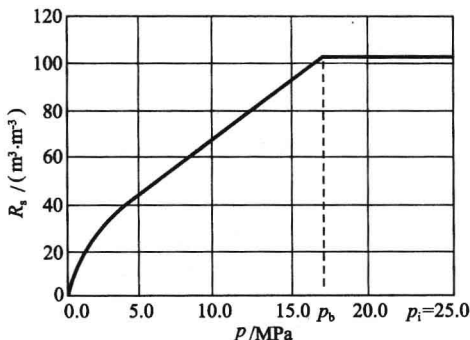


图 2-3 典型地层油一次脱气溶解气油比曲线

(3) 溶解气油比的大小除与温度和压力有关外,还与地下原油的脱气方式有关。实践证明,接触脱气获得的溶解气油比大于多级脱气获得的溶解气油比。通常以接触脱气为准来表示溶解气油比的大小。

(4) 溶解气油比的大小还和油气性质有关。一般而言,油、气密度差异越小,溶解气油比越大。

二、地层原油的体积系数

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

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

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,地层原油的体积总是大于它在地面脱气后的体积,故原油的地下体积系数 B_o 一般都大于 1。

图 2-4 给出了原油地下体积系数和压力的关系。由图 2-4 可以看出,当压力大于泡点压力 p_b 时, B_o 随压力的降低而增加,这是因为随着压力降低,单相地层原油体积发生