



油气田开发基础理论丛书

# 油藏工程 基础与方法

刘蜀知 孙艾茵◎编著

youcang gongcheng  
jichu yu fangfa

OIL-GAS FIELD  
DEVELOPMENT

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是一部阐述油藏工程基础和基本方法的论著,重点介绍油藏工程的基本概念、油气藏储量与采收率、油田开发基础、试井分析方法、油气藏物质平衡方法以及矿场经验方法等。

本书可供从事油气田开发的工程技术人员及管理人员使用,也可作为高等院校石油工程及相关专业学生的教材和参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

油藏工程基础与方法/刘蜀知,孙艾茵编著.  
北京:石油工业出版社,2011.1

(油气田开发基础理论丛书)

ISBN 978-7-5021-8117-8

I. 油…

II. ①刘… ②孙…

III. 油田开发

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 222598 号

油藏工程基础与方法

刘蜀知 孙艾茵

---

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

编辑部:(010)64523535 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

---

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:14.25

字数:360 千字 印数:1—2000 册

---

定价:65.00 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

油藏工程是研究油气资源开发的一门学科。它是以石油勘探结果为起点,以油气藏为研究对象,以石油地质学、油层物理、渗流力学、物理化学等学科为理论基础,以数学、计算机科学、经济学等学科为研究工具,以高效开发油气资源为目标的一门综合性边缘学科。具体来讲,油藏工程就是一门认识油气藏,并综合运用现代科学技术开发油气藏的学科。它不仅是方法学,而且是以战略高度指导油田开发决策的学科。其研究的主要目的是科学合理地开发油气田。因此,首先要通过油藏地质研究认清油层及其中流体的特性,对油气藏的储量规模和产油气能力做出科学的评价;再结合经济分析,设计并实施油藏开发方案,同时对油气生产过程进行动态监测。油藏工程就是紧紧围绕储量、产能和效益这三大主题而开展工作的。

油藏工程形成于 20 世纪初期,发展于 20 世纪中叶,定型于 20 世纪末期。随着油田开发水平的提高、油藏类型及开发方式的变化,油藏工程也得到了不断的丰富并取得了长足发展,其研究方法也在不断更新和进步,仅靠一本书的篇幅不足以介绍其所有的内容。因此,本书主要强调油藏工程的基础理论和基本方法,读者通过学习和领会这些基本知识,可以把握油藏工程的本质规律,在实际应用时就可以得心应手地自由发挥和扩展。

本书的内容是集作者过去 20 多年的教学与研究成果而成,并参考了多部国内外油藏工程方面的教材和专著,学习吸收了该领域中的集体智慧,在此作者特向油藏工程领域的前辈们表示敬意!

全书共分八章,内容包括绪论、油藏工程的基本概念、油气储量与采收率、油田开发基础、试井分析方法、油藏物质平衡方法、气藏物质平衡方法、矿场经验方法等。第一至第四章由西南石油大学刘蜀知教授和孙艾茵副教授编写,第五至第八章由刘蜀知编写。

由于作者的知识水平和能力所限,书中难免有不足或不当之处,敬请同行和读者批评指正,以求今后不断完善和提高。

编 者  
2010 年 5 月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
第一节 油藏工程概述 .....	(1)
第二节 油田开发实例分析 .....	(5)
<b>第二章 油藏工程的基本概念</b> .....	(9)
第一节 油、气聚集单元 .....	(9)
第二节 储层及性质 .....	(12)
第三节 流体分布及性质 .....	(20)
第四节 油气层压力与温度 .....	(29)
第五节 相态特性 .....	(34)
第六节 油气藏类型及开发措施 .....	(37)
<b>第三章 油气藏储量与采收率</b> .....	(42)
第一节 油气田勘探程序与任务 .....	(42)
第二节 油气储量的分类与分级 .....	(44)
第三节 储量计算的容积法 .....	(47)
第四节 油气储量的综合评价 .....	(56)
第五节 油藏采收率预测方法 .....	(59)
<b>第四章 油田开发基础</b> .....	(67)
第一节 油田开发前的准备阶段 .....	(67)
第二节 油田开发基本原则与方案编制内容 .....	(69)
第三节 油田开发方式 .....	(72)
第四节 油田的驱动方式 .....	(77)
第五节 开发层系的划分与组合 .....	(81)
第六节 油田开发井网部署 .....	(82)
第七节 钻井类型的选择 .....	(85)
第八节 油田开发调整 .....	(87)
第九节 油田开发指标 .....	(90)
<b>第五章 试井分析方法</b> .....	(94)
第一节 油井稳定试井 .....	(95)
第二节 压降试井 .....	(98)
第三节 压力恢复法试井 .....	(107)
第四节 干扰试井 .....	(113)

第五节	现代试井解释方法概况 .....	(115)
<b>第六章</b>	<b>油藏物质平衡方法 .....</b>	<b>(125)</b>
第一节	油藏饱和类型和驱动类型的划分 .....	(125)
第二节	油藏物质平衡方程式的建立 .....	(126)
第三节	油藏驱动指数计算与驱动能力判断 .....	(133)
第四节	封闭性油藏储量计算 .....	(136)
第五节	油藏水侵量计算 .....	(140)
第六节	天然水侵油藏的储量计算 .....	(153)
第七节	油藏动态预测 .....	(155)
<b>第七章</b>	<b>气藏物质平衡方法 .....</b>	<b>(160)</b>
第一节	气藏物质平衡通式的建立与简化 .....	(160)
第二节	水驱气藏的早期识别方法 .....	(163)
第三节	定容封闭气藏 .....	(168)
第四节	水驱气藏 .....	(174)
第五节	异常高压气藏 .....	(182)
第六节	凝析气藏 .....	(187)
<b>第八章</b>	<b>矿场经验方法 .....</b>	<b>(194)</b>
第一节	水驱油田高产稳产和产量递减预测方法 .....	(194)
第二节	油气产量递减分析 .....	(197)
第三节	油田含水规律及应用 .....	(209)
<b>附录</b>	<b>不同单位制的换算关系 .....</b>	<b>(218)</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(220)</b>

# 第一章 绪 论

油藏工程是石油工程的一个重要组成部分,是一门从整体上认识和改造油气藏,合理高效地开发油气藏,提高烃类采收率的学科。它综合应用地球物理、油藏地质、油层物理、渗流理论和采油工程等方面所提供的信息资料以及研究成果,对油藏开发方案进行设计和评价;利用有效的开采机理、驱替理论和工程方法分析和预测油藏未来的开发动态;并根据预测结果提出相应的技术措施,以获得最大的经济采收率。

## 第一节 油藏工程概述

在 20 世纪初,油气田开发所能依据的理论、方法和采用的手段十分有限,对油气层及其能量的认识和研究还停留在初级水平上,基本上是靠天然能量进行油气的开采。自 20 世纪 40 年代油藏工程创立以来到现在的半个多世纪中,这门学科取得了长足的发展。这缘于研究油气藏的方法和手段得到了根本性的改变,同时由于测试和开采手段发生了重大变革。因此,对油气藏进行全面研究和整体解剖成为可能,从而可以从战略的高度上对油气田进行总体规划、统一部署和高效开发。

### 一、油藏工程的特点

对含油气构造进行预探发现其具有工业油气流以后,紧接着就要进行详探并逐步投入开发。油气田开发就是依据详探成果和必要的生产性开发试验,在综合研究的基础上对具有工业价值的油气田进行建设和投产。应当从实际情况出发,根据生产规律制订出合理的开发方案,使油气田能够按照预定的生产能力和最优的经济效益长期生产,直至废弃。

工程项目实施之前必须精心设计,并且需要前期工程作铺垫。有些工程在正式设计前还应进行可行性研究。油藏工程也不例外,但又有其自身的特点。

对油气藏的认识不是短时间一次完成的,需经历由粗到细、由浅入深、由表及里的长期认识过程。油气藏埋藏在地下,看不见,摸不着。浅层可近地表,深层可达五六千米,面积甚至绵延几十、几百平方千米。而且油气属于流体矿藏,其状态和性质随环境条件的改变而不断变化,不可能采掘出来再加以观察和描述。只有采用地球物理等间接方法进行探测,或在油气藏上钻若干口井(可视为油气藏的窗口)设法窥视其内部的状况。显然,井钻得越多,直接获得的信息就越多,所描述的油气藏就越接近实际情况。这就是说,初期对于油气藏的认识比较粗糙,而随着开发的不断延续认识将不断细化和深化。

油气是流体矿藏。凡是有联系的油气藏矿体,必须视作统一的整体进行开发。不像固体矿藏那样可以简单地分隔,独立地开发,而不会影响相邻固体矿藏的蕴藏条件及邻井地段的含矿比。在与油气藏有联系的任何一个区段采出油气或注入水或气,都会导致整个矿藏的压力、状态等发生变化,相邻矿区的油气含量也会发生变化,甚至可以导致远离开区仅有含水域相连通的另一油气田的聚集状态发生变化,例如产生气顶或气顶消失等。

因此,勘探与开发油气田不能只局限于任何矿藏的局部地段进行较详细的研究,必须对有可能成为统一流体水动力系统的整个矿藏有足够的全面认识,包括对含油、含气边缘以外区域的认识。对于那些可以分隔流体形成屏障的断层、隔层、夹层、盖层和底层也应进行专门研究。除了要与开发固体矿藏一样研究矿体的几何形状、储藏条件、含矿比和储量外,油气藏开发还要特别研究流体的渗滤性质,并注意这些性质随时间、空间以及其他影响因素的变化。也就是说,不仅要研究油气田的原始静止状态,而且要时刻关注其动态变化,跟踪不同时期剩余油气的分布状况,以确保自己的认识及设计立足于最新、最可靠的动态资料基础之上。

开发油气田时,还必须充分重视和发挥每口井的双重作用——生产与获取信息的功能。这是开发工作者应该时刻考虑和研究的。世界上除了个别油藏采用矿山坑道开采外,绝大多数的油气田都是从地面钻取井眼进行开采的。所钻取的油气井具有双重作用:它既是采集油气和对地层施加人为影响的通道,又是窥视油气藏内部和获取各种信息的窗口。能否利用最少的井数将油气从油气藏中经济地开采出来,同时搞清楚油气田的地下情况,是衡量油田生产技术水平的一个重要标志。

油气田的开采是知识密集、技术密集、资金密集的庞大工业。油气田地域辽阔,地面地下条件复杂多变;各种井网、管网和集输系统星罗棋布;并且存在着多种因素的影响和干扰,使得油气田开发工程必然要集知识密集、技术密集和资金密集于一身,成为综合应用多学科技术的巨大工程。它主要涉及地质、物探、钻井、采油、油藏、储运、经济、管理、水电和土建等多个部门。在这些部门内部以及相互之间有数以亿计的信息要进行存储、处理、衔接、反馈、控制和协调。因此,在油气田开发中如何充分应用现代电子技术、现代系统论、信息论、控制论和优化理论于油田开发设计、生产、组织和经营中,是一项有待于深入研究的重大课题。这就要求油藏工作者既要有扎实的理论知识和丰富的实践经验,又要有高度的责任心和使命感,不断地学习和吸取新知识,及时总结经验教训,科学严肃地对待各项开发技术工作,搞好油气田的开发经营和管理工作。

## 二、油藏工程的发展史

自从美国于1859年开始大规模采油以来,油田开发事业已经历了150多年的发展历程,油藏工程也随着油田的开发和开采实践而逐步发展和成熟起来。

从1859年到1930年前后的70来年期间内,油田开发的主要特点是没有把油田看成一个整体,而是各自为政地分割开来进行独立开采。当时,世界石油工业处于起步阶段,油田数量少、面积小、油层埋藏浅。在当时的科学技术和工业装备条件下,加上油田的不同区域归属于不同的资本家所有,所以不可能把油田作为统一的整体进行全面规划和开发。在这个时期,钻井生产几乎是唯一的开发手段。当时的石油科技工作者研究的主要是关于井网密度的问题。

20世纪20年代前后,美国苏联等国的石油科技工作者曾发表了大量的文献和著作,探讨井网密度对油层和油井产量的影响。他们认为井网越密,也就是整个油田上的井数越多,整个油田的产量就会越大。因此,他们主张采用高密度井网来开发油田。在美国油田开发的相当长时间里,这种观点一直占据上风。因此这个阶段还谈不上油藏工程的概念。

1925年11月,在莫斯科召开的“保护和合理使用油藏”的研讨会上,苏联的一些学者提出了与前述观点不同的论点。阿勃拉莫维奇在他的“合理开发油田原则”的报告中就主张建立一种合理开发油藏的理论,并提出应该科学合理地确定油田的生产井数。

从1930年至1940年前后的10余年间,一些国家开始把油田看成一个整体来开发。1933

年,苏联举行了全苏第一届石油工作会议。在会上著名学者古勃金指出:许多油田开发工作者好像不是在开采整个油层和整个油田,而是像管理孤立的机器设备那样对待开采油气的井。在这个时期,作为油田开发基础理论之一的油层物理学研究取得重要进展。美国人法奇(Fancher)于1933年首先开创了油层物理的研究;1934年马斯凯特(Muskat)等人以达西渗滤方程为基础,提出了测量油层岩样渗透率的方法;1935年,西尔绍斯(Schilthuis)发明了井底取样器并提出了测量所取样品物理性质的方法;1936年,西尔绍斯利用油藏流体物性参数首次导出了油藏的物质平衡方程。该平衡方程后来成为油藏工程师用来计算原始油气地质储量和进行油藏动态分析计算的基本方法,并沿用至今。

随着所开发油田的数量增多,人们发现油藏中存在着各种各样的能量,从而创立了油藏驱动能量学说。1937年,马斯凯特开始把地下流体力学理论应用到油田开发中来,尝试将流体在多孔介质中的流动归纳组织成为一门学科。1938—1942年,巴磊歇夫等针对油井排给液流产生的截流作用进行了一系列的试验。研究结果表明:对于水压驱动的油藏,如果井底流压保持不变,当井网密度达到一定程度后,再继续增加井数不会提高油藏的总产油量。

从1940年至1950年前后,油田开发工作者进行了规模不断扩大的人工注水开发实践,进一步确立了油田开发的理论基础。1940年以后,美国人巴克来(Buckley)和列维瑞特(Leverett)连续发表了油水两相和油气水三相流动的研究报告和论文,为建立水驱油两相及多相渗流理论做出了突出贡献;1943年,赫尔斯特(Hurst)提出了预测油藏水侵量的方法;1944年,塔纳(Tarner)提出了确定气顶和溶解气驱油藏采收率的方程,为解读油气驱替机理作出了巨大贡献,极大地提高了人们对于油层内部流体运动规律的认识。1945年,阿普斯(Arps)正式推广使用了预测油气产量的递减曲线分析法。1948年,苏联著名学者克雷洛夫出版了《油田开发科学原理》。该书综合运用油矿地质学、地下流体力学及经济学的基本理论与方法研究和解决油田开发中的问题,从而建立了比较完整的油田开发理论。在这个时期,世界上已有不少油田采用了注水方式对油田进行开发,但主要是通过各种形式的边缘注水来补充油层的能量。

从1930年至1950年期间,油层物理、渗流力学以及油田开发基本理论等学科的发展为油藏工程的形成和发展奠定了基础。

20世纪50年代以来,油田开发事业步入了现代化的发展阶段,其发展概况可以归纳为以下8个方面:

(1)20世纪50年代后,油田开发的科学原理和油田开发实践都取得了新进展。作为油田开发理论基础之一的地下流体力学及其在油田开发设计计算和分析上的应用获得重大突破。在油田开发实践方面,不仅根据实际情况发展了边缘注水方式,而且苏联于1956年在罗马什金大油田首次采用了内部切割注水方式进行油田开发。这是油田开发史上的又一个创举,谱写了大规模人工改造油田的新篇章。这种新的注水方式被我国以及很多国家采用,获得了满意的开发效果。

(2)各种先进的观察和测量仪器仪表的发明以及模拟实验技术与装备的应用,极大地加深了人们对油层及其中流体从宏观到微观上的认识,为深入揭示油层的性质和其中流体运动的规律,进而从事油层改造创造了极为有利的条件。

(3)20世纪50年代以来,各种研究油层的数值模拟方法也有了进一步的发展。特别是1953年美国人布儒斯等首次把计算机应用于研究油田开发问题之后,计算机在油田开发上的应用得到了迅速发展。1959年美国学者道格拉斯和皮斯曼等应用数值方法用计算机求解了描述两相多维渗流的复杂偏微分方程组,使计算机在油田开发上的应用达到崭新阶段。此后,



计算机在油田开发各个领域的应用都取得了重要进展。特别是用于研究渗流规律,诸如在求解三维三相渗流方程和双重介质渗流方程时发挥了巨大的作用。

(4)开发和采油工艺技术取得了新成就。世界上大多数油田都是多层的,以往多采用笼统开采的工艺技术。进入20世纪60年代后,美国已有数量可观的油田利用不同井网分采不同层系的油层。苏联也在同一时期采用了该项新工艺技术。为了减少井数和投资,美国和苏联还发展了单井分采不同层系的工艺技术。

(5)为提高油田的采收率而展开的各种新的开发方式的研究取得了一定的成效。目前提高采收率的主要途径是热力驱油和化学驱油。热力驱油主要包括向油层注入热蒸汽和火烧油层等;化学驱油主要包括聚合物驱、表面活性剂驱、碱水驱和三元复合驱等。近年来还研究开发了利用微生物提高原油采收率的方法。

(6)油藏精细描述技术的发展和成熟,使得人们对油藏的认识更加深入和准确。剩余油分布的定量描述,为选择更合理的开发方式和开发井网奠定了基础。

(7)油藏经营概念的诞生与经营模式的创立,使得石油科技工作者能够运用各种方法和手段对一个区块进行系统研究。从油田地质、油田开发、开采工艺、经济评价以及整体规划等诸多方面进行分析和评价,从而针对油田开采现状指出存在的问题,并采取相应的对策,比如有效的增产增注措施,来提高油田的开采效益。

(8)钻井技术的发展,特别是水平井、定向井、丛式井和多分支井技术的应用,使得油田开发能够更好地控制地下储量,有效开发一些特殊油藏和边际油田,以较少的投入获得最大的经济效益和社会效益。

因此,油藏工程形成于20世纪之初,发展于20世纪中叶,定型于20世纪末期。

### 三、我国油气田开发工程沿革

据历史记载,我国是最早发现和利用石油,进行钻井和采油的古老国家之一。只是由于封建和半封建社会持续太久,以致在近代反而落后了。直至1949年中华人民共和国的成立,我国的石油工业才迅速发展起来。

新中国成立前,我国天然油的最高年产量只有 $32 \times 10^4 \text{t}$ ,而1949年的产油量还不到 $7 \times 10^4 \text{t}$ 。仅有老君庙、延长、独山子和台湾4处天然油产地,根本谈不上科学地开发油田。

我国的油田开发工程是与新中国一起成长发展起来的。20世纪50年代前期,我国积极恢复玉门和延长油矿的生产以及东北的人造石油工业,主要在西北勘探石油。1956年克拉玛依油田的发现是新中国石油勘探的第一个突破。50年代中后期石油勘探战略东移。1959年9月26日,东北松辽盆地的松基三井喷油揭开了发现大庆油田的序幕,大庆油田是世界特大油田之一。从油田开发之初,广大石油开发工作者就认真做好每一项开发的技术基础工作,同时又认真学习世界上先进产油国家在油田开发方面的先进技术,吸取其经验教训,使大庆油田从油田开发到采油等一系列工艺技术都达到了一个崭新的水平,为我国的油田开发事业提供了宝贵的经验。1976年,大庆油田原油年产量达到 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 。1978年我国原油产量突破了 $1 \times 10^8 \text{t}$ 大关,为工农业的发展作出了巨大贡献。

目前,我国已在25个省、自治区和直辖市以及浅海海域开展了油气资源勘查工作。勘查面积达320多万平方千米,开采面积近 $7 \times 10^4 \text{km}^2$ 。在23个含油气盆地中发现了700多个油气田,形成了六大油气产区。2009年全年共生产原油 $1.8949 \times 10^8 \text{t}$ 、天然气 $830 \times 10^8 \text{m}^3$ ,建成了大庆、胜利、长庆、新疆、辽河、四川以及海洋等20多个主要的油气生产基地。这些生产基地

的油气藏类型多种多样,我国学者从开发生产的角度出发,将其划分为10类,即:(1)整装中高渗透的大中型砂岩油藏;(2)低渗透砂岩油藏;(3)气顶油藏;(4)边底水油藏;(5)裂缝性层状砂岩油藏;(6)砾岩油藏;(7)碳酸盐岩及变质岩、岩浆岩油藏;(8)高凝油、高含蜡及析蜡温度高的油藏;(9)重质油藏;(10)凝析气藏。提出了开发不同类型的油气藏时,需要考虑的设计原则、开发模式和应当采取的主要措施。近年来,我国石油企业已跨出国门,参与了中亚、北非、南美以及中东等地区石油资源的开发。经过几代开发工作者的引进学习、消化吸收和实践创新,从整体上来看,目前我国的油田开发水平已跨入世界的先进行列。

### 四、油藏工程师的任务

油藏描述的主要任务是要弄清楚油藏类型、油气层的厚度和构造形态、油水和油气界面、渗流物理特征、孔渗饱和和流体参数的分布、储量大小及其分布等。油藏工程师要在油藏描述的基础上建立地质模型和油藏工程模型,依据各种有效的或可能变成有效的采油机理及驱动方式来预测油气藏的动态,并对不同的油气藏开发方案进行经济评价,提出改善开发效果的方法和技术,从而提高采收率并获得最大的经济效益。

解决以下问题是油藏工程师的中心任务:

(1)油藏的圈闭机理是什么?(2)油气地质储量有多大?(3)油藏的驱动机理是什么?(4)油藏一次采油的采收率为多少?(5)油藏的采油速度是多少最合理?(6)如何科学合理地提高最终采收率?(7)回答和解决上述问题需要哪些基础资料和数据?

在这里要回答的基本问题是原油聚集成藏的因素是什么。油气聚集到一起形成油气藏要具备4个条件:源岩、密封的岩石盖层、储层和圈闭机制。油藏工程师通常很关心油藏性质。其实,了解储层圈闭机理对于油藏工程师也很重要。不然,在分析油藏时就容易出错。圈闭的类型主要包括构造圈闭、地层圈闭、断层圈闭、水动力圈闭和复合圈闭等。各种圈闭共同的特征是必须具备闭合的等高线。很容易理解:初期所有的圈闭都被水体充满。当油气生成后,就开始运移进入到储集层中,并且由于密度的差异持续向上运移直到抵达圈闭或者溢出地面。

容积法和物质平衡法是计算油气地质储量的常用方法。采用容积法需要的参数包括油层厚度、孔隙度、流体饱和度以及地层原油体积系数等。前三个参数可以由测井数据和岩心数据获得。在实验室测量从油藏中取得的或配制的油藏流体样品,可获得地层体积系数。使用物质平衡法计算油气地质储量所需要的数据包括:不同压力下油、气、水的体积系数和溶解气油比等油藏流体的高压物性参数;不同油藏压力所对应的累积产油量、产水量和产气量等。物质平衡方程和计算出来的各种驱动指数能够指示不同驱动机理的相关驱动强度。巴克来(Buckley)、列维瑞特(Leverett)和塔纳(Tarner)的驱替理论能够用于预测未来的采油速度和采收率。用该理论进行预测计算时需要利用特殊岩心分析处理,获得毛管压力和相对渗透率数据。产量递减曲线分析法也可用于预测采油速度和最终采收率。为了提高油藏的采收率,通常向产层中注入各种驱替剂。其中最常用的是注水,也可以注气、注蒸汽、注混合气、注聚合物和注表面活性剂等。各种提高原油采收率的方法都是建立在精确的油藏模型基础之上的。

## 第二节 油田开发实例分析

下面通过一个简单的油田开发实例,来介绍和分析各勘探开发阶段的主要工作目标和研究内容。

## 一、勘探阶段

某地区通过地震勘探发现地下有一个可能含有油气的背斜构造。该构造轴向被切割,左右块间有一断层,其构造如图 1-1 所示。为了证实其内是否存在油气,在构造上打了一口探井(称为预探井)。此井证实该构造中确实含有油气。但是存在多少油气?有没有工业开采价值?该油田的几何形态、含油面积以及内部结构如何?需要多大的投资规模来开发该油田?此时是无法回答的,还需通过进一步探边、详探和评价来解决这些问题。

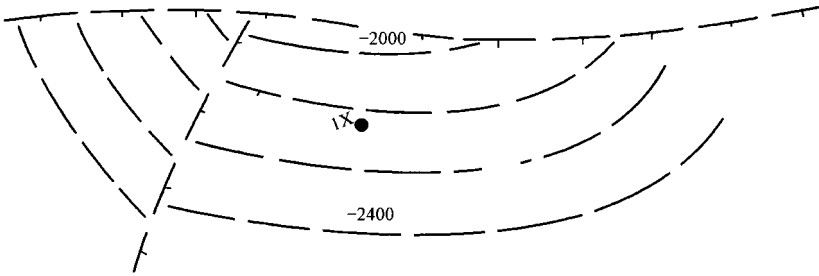


图 1-1 勘探发现阶段构造图

## 二、油藏评价阶段

油藏评价阶段又称为详探阶段,它是在预探提供的含油面积上加密钻探。其主要任务是查明油气田,确定油气藏的特征及含油气边界,圈定含油气面积,提交二级探明储量。为制定合理的油气田开发方案提供完整的地质基础资料。其中包括含油气构造的圈闭类型、大小和形态,含油气层位的有效厚度、含油高度以及物性参数。还有油层压力、驱动类型和生产能力等准确齐全的资料和参数。

为了对该构造进行油藏评价,在其上部署了 4 口评价井。其中 3、4、5 号井钻遇含油区,2 号井钻遇了水区。此阶段的地质研究发现:4 号井附近存在断层,中心断块 -2400m 等高线附近为水区。并确定了中心断块油水接触面的位置。经过详探评价得到的初步成果如图 1-2 所示。但是,此时仍存在一些地质问题尚未解决。例如左右两断块的地质情况和油水接触面的位置还不能判定。

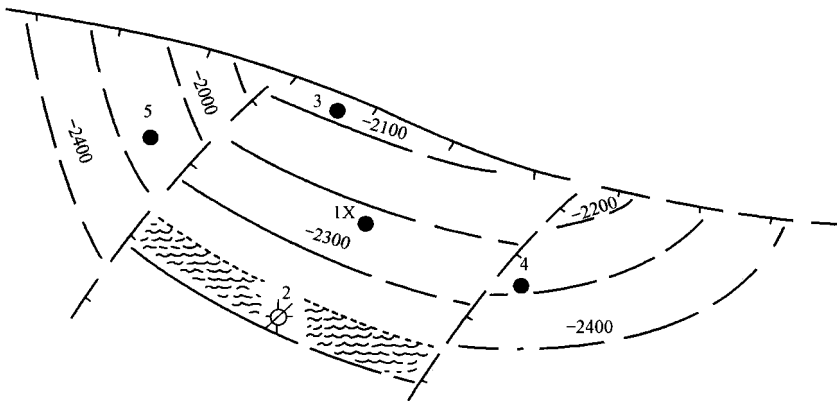


图 1-2 评价阶段构造与井位图

### 三、油田开发方案设计与实施阶段

经过初步评价及油田开发可行性研究后,便可转入制定油田开发方案的阶段。作为初步考虑,此时可假设左右两断块的油水接触面位置与中间断块一样,均位于同一条等高线上。采用数值模拟等方法对各种开发方案进行计算。通过对比各方案的技术指标和经济指标即可优选出最佳的开发方案。其中包括开发层系、井网类型、井网密度、开采方式以及采油速度等。开发方案确定后的油田布井方案如图 1-3 所示。

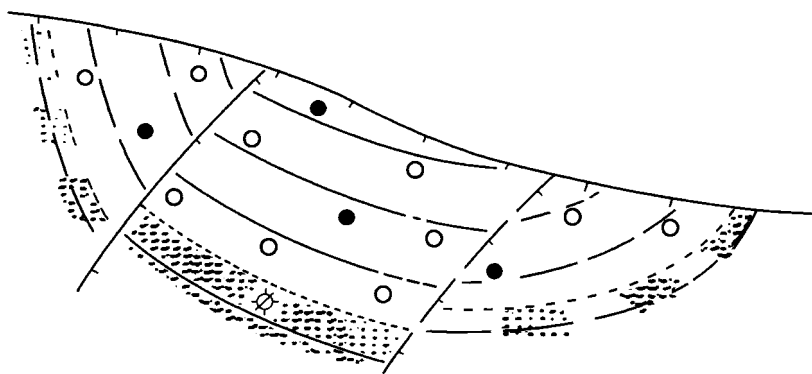


图 1-3 开发井网部署图

### 四、开发调整阶段

油田开发早期,从生产井中获取的信息有限,还不能完整地描述油田地质情况。随着油田开发的深入,生产井数不断增加,获得的信息越来越多,就可对原有的地质认识进行修正和完善,因此有必要对开发方案做出相应的修改或调整。在上述油田的开发过程中,大多数生产井的实际资料显示:该油田的含油面积没有原来估计的大;左右两断块的含油面积不够准确;右断块与中心断块间的断层位置也存在着偏差,都需要进行修正。对开发方案修正后决定在构造的较高部位打些补充井。中心区块的生产井数也不够,因此在原计划的井间再打些补充井作为修正。图 1-4 是开发调整阶段的构造与井网示意图。

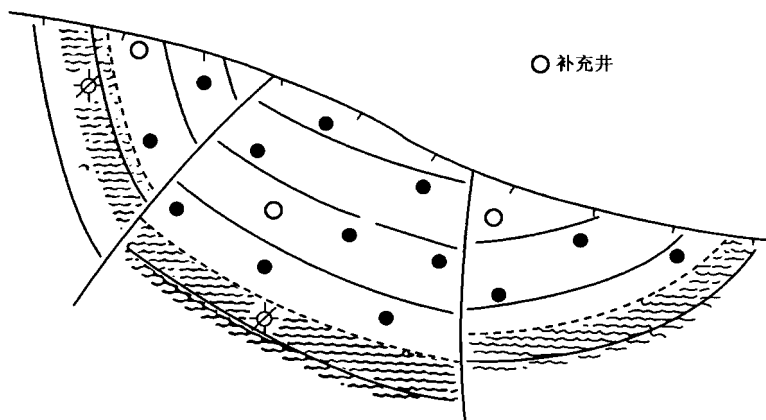


图 1-4 开发调整阶段构造与井网图

### 五、提高采收率阶段

开发调整结束后,生产井的数量保持相对稳定。然而,随着油气不断地开采出来,油田产量开始递减。如果不及时采取相应的措施,产量会很快降至开发经济极限,油田将会失去开采价值而被废弃。此时,油田需要转入提高采收率阶段,向产层注入表面活性剂、CO<sub>2</sub>、互溶剂、聚合物等驱替介质进行三次采油。此阶段一直延续到经济极限为止。此阶段的井网如图1-5所示。

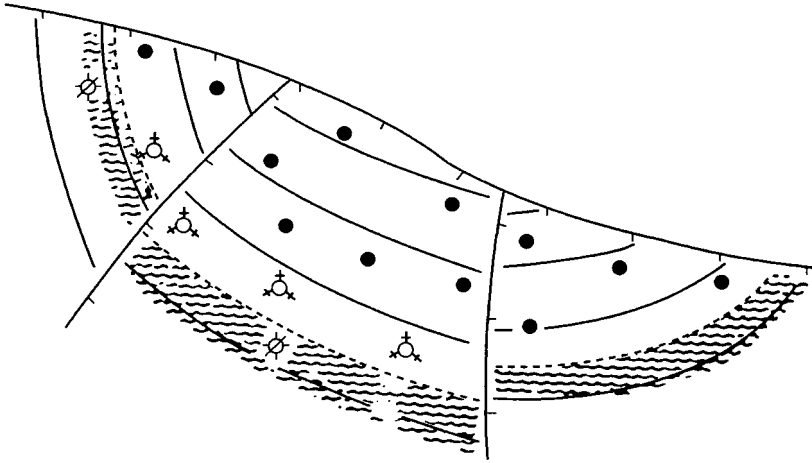


图1-5 提高采收率阶段井网图

总而言之,一个油田的整个开发过程可划分成若干阶段。上述几个开发阶段只是简要地描述了油田的开发历程,实际情况可能要比这个例子复杂得多。由此可见,油田开发是一个对油藏认识不断深化、使油田生产不断完善、开采不断优化,从而最大限度地接近实际的过程。这与许多只通过一两次调查和研究,就能完成全过程的工程设计是极不相同的。

## 第二章 油藏工程的基本概念

油藏深埋在地下,其几何形态、空间分布以及内部结构如何?其所含油气水的分布、性质、状态又怎样?这一系列问题是开发一个油气田需要首先了解和解决的。也就是要对油藏的概念、所处的位置,从外部到内部,从宏观到微观给予完整的描述,形成明确、完整并符合实际的地质体概念。建立起油藏的实体模型后,才能对它进行合理高效地开发。

### 第一节 油、气聚集单元

经过长期的勘探开发实践发现:油、气在地壳中的分布,是受区域地质构造及岩性、岩相等地质条件的控制而成群、成带有规律出现的。油藏、气藏只是地壳中油、气聚集的最小单元。从小到大依次还有油气田、油气聚集带、含油气区和含油气盆地等。

#### 一、沉积盆地内构造单元划分

对于一个沉积盆地的构造区划来说,可以进一步划分为三级,即一级构造、二级构造和三级构造。

##### 1. 一级构造

一级构造是指根据盆地基底的起伏情况划分的坳陷、隆起和边缘斜坡等。

(1)坳陷是盆地主要发育时期的沉降中心或沉积中心。一般是盆地中沉积地层最全、地层最厚的地方,其中心是有利的生油地区。

(2)隆起为盆地中相对于坳陷来说较高的突起的地方。一般沉积地层不全,即某一时期的沉积地层缺失或被剥蚀,因而厚度不大,一般不利于生油。

(3)边缘斜坡是指盆地中坳陷与边界的过渡地区。其沉积地层一般是由老层到新层,呈超覆的接触关系。超覆带往往是储集油、气的有利地带。

##### 2. 二级构造

二级构造是指在一级构造范围内再进一步划分的凹陷、凸起、长垣、背斜带和阶地等。

(1)凹陷为盆地中沉积地层最厚的地方,一般是有利的生油区。

(2)凸起、长垣和背斜带都是相对于凹陷的正向构造。一般都是油、气聚集的有利地带。

(3)阶地一般处在坳陷与隆起或斜坡之间,是由阶梯状正断层所形成的平坦地带。有时它也是油、气聚集的有利地区。

##### 3. 三级构造

三级构造也叫局部构造。它是在二级构造范围内的背斜、向斜(图2-1)和鼻状构造等。其中背斜和鼻状构造(图2-2)都是油、气聚集的有利构造。

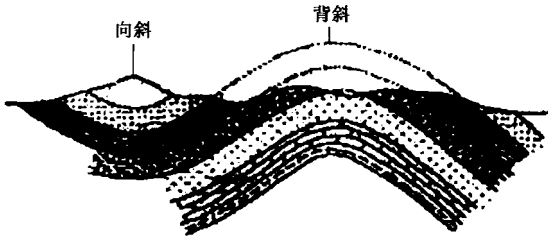


图 2-1 背斜与向斜图

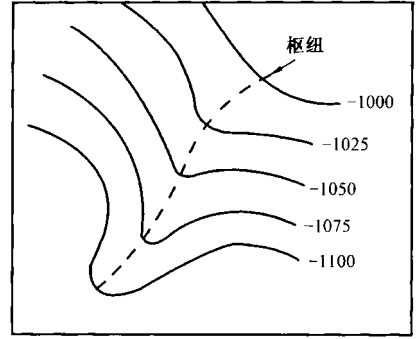


图 2-2 鼻状构造图

## 二、油、气聚集单元划分

### 1. 油(气)藏

在单个圈闭中(图 2-3),具有统一压力系统的油(气)的基本聚集称为油(气)藏。其中“基本聚集”的含义是指油、气聚集的数量足够大,即具有开采价值。人们又把具有开采价值的油(气)藏称为“工业油(气)藏”。究竟聚集多少数量的油、气才算有开采价值?这取决于当时的政治、经济和技术等各方面的条件和需要,要进行综合考虑。一般是把能获得的经济收益大于全部投资费用的油(气)藏,定为具有开采价值的油(气)藏。

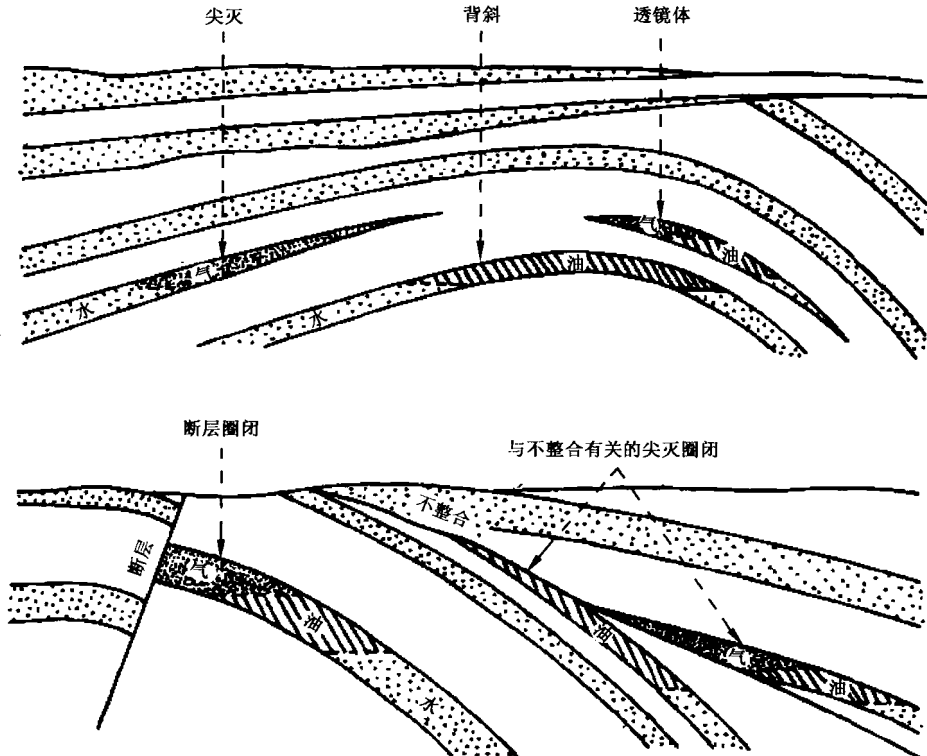


图 2-3 几种油气圈闭类型的横剖面图

## 2. 油(气)田

油(气)田是指受同一局部构造面积控制的油(气)藏的总和。如果在这个局部构造范围内只有油藏,则称为油田;只有气藏,则称为气田;如果既有油藏又有气藏,则称为油气田。

油(气)田的全部含义,除上述地质学上的概念之外,还可以理解为地理上包括一定范围、经济上是基本建设的独立投资核算单位等。例如大庆油田的含义就相当广泛了。

## 3. 油、气聚集带

油、气聚集带是指同一个二级构造带中,互有成因联系的、位置相近的、油气聚集条件相似的一系列油(气)田的总和。

从油、气藏形成的全过程可以得知:油、气运移是区域性的,即运移的主要指向是二级构造带。当二级构造带与生油凹陷连通较好或相距较近时,整个二级构造带上的各个局部构造内的所有圈闭都有可能形成油(气)藏,致使油(气)田成群成带出现,形成油、气聚集带。因此,油、气聚集带的形成是二级构造带与油源区和储集岩相带有利组合的结果。

## 4. 含油气区

含油气区是指在同一大地构造单元内,具有统一的地质发展历史和油气生成、运移及储集条件的区域,即为包括若干个二级构造带和生油凹陷的沉积拗陷。

## 5. 含油气盆地

地壳表面上的低洼地,包括陆地上的湖泊和大洋中的海域,在漫长的地质历史进程中,不断下沉,接受沉积,当今已被沉积岩所充填,地质学术语称为沉积盆地。沉积盆地是石油地质勘探工作者首先要调查研究的对象。

含油气盆地是指那些在地质历史上曾经发生过油气生成、运移和聚集过程的沉积盆地。或者说,在沉积盆地中,如果发现了具有工业价值的油、气田,那么,这种沉积盆地即可称为含油气盆地。也可以说,凡是地壳上具有统一的地质发展史,有发育良好的生、储、盖组合和圈闭条件,并已发现油、气田的沉积盆地,均可称为含油气盆地。

## 三、油气聚集单元与构造单元的对应关系

油、气聚集单元与构造单元的对应关系示于表 2-1 中。

表 2-1 油、气聚集单元与构造单元对应关系

大地构造单元		油、气聚集单元
沉积盆地		含油气盆地
一级	拗陷	含油气区
	隆起	
二级	长垣、凸起	油、气聚集带
	背斜带、凹陷	
三级	背斜	油(气)田
	鼻状构造	
圈闭		油(气)藏



大量的勘探实践与科学研究证明,世界上 99% 的油(气)田都是在地壳上沉积岩分布区发现的。因此,石油地质工作者总是把地壳上的沉积盆地当作主要的勘探对象。在一个沉积盆地中,如果发现了油、气,其分布是有一定规律的。

## 第二节 储层及性质

储层究竟有哪些特性呢?首先要弄清楚什么是储层。石油深埋在地下,是一种流体矿藏。人们不禁要问,石油在地下是像“石油河”呢?还是“石油海”呢?其实都不是的,石油储藏在地下具有孔隙、裂缝或孔洞的岩石中。因此,凡是能储集油和气的、具有孔隙性和渗透性的岩石都可称为储层。世界上最常见的是碎屑岩和碳酸盐岩储层。

### 一、储层的类型及基本特征

目前,世界上绝大部分的油气储量集中在沉积岩储层中,其中又以碎屑岩和碳酸盐岩储层最为重要。只有少数油气储集在岩浆岩和变质岩中。石油地质学常按岩石类型把储层分为三大类:碎屑岩储层、碳酸盐岩储层和其他岩类储层。

#### 1. 碎屑岩储层

碎屑岩储层是世界上各主要含油气区的重要储层之一。许多特大油田,如苏联西西伯利亚盆地的各大油田,科威特的布尔干油田,委内瑞拉的玻利瓦尔湖岸油田,美国的普台德霍湾油田,中国的大庆油田等,它们的储层都是碎屑岩储层。

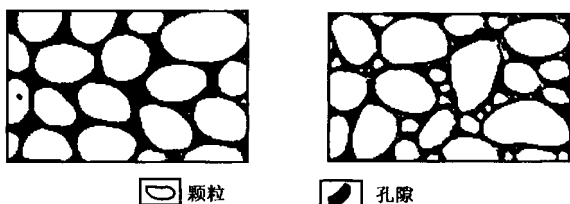


图 2-4 碎屑岩储层中颗粒和孔隙分布示意图

碎屑岩储层的岩石类型有砾岩、砂砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩。目前,我国所发现的碎屑岩油气藏以中、细砂岩为主。碎屑岩储层的孔隙类型是以原生的粒间孔隙为主(图 2-4),孔隙度一般为 5% ~ 40%。此外还有次生的溶蚀孔隙,胶结物重结晶而出现的晶间孔隙,矿物的解理缝,层理缝

和层间缝等。其储油物性除受沉积环境、岩石成分和结构构造控制外,在漫长的成岩历程中,地下温度、压力、孔隙水成分等的改变,都对储层孔隙有着重要的影响。这些因素主要包括压实作用、溶解作用和胶结作用等。

砂岩体是碎屑岩储层的主体,是指在某一沉积环境下形成的,具有一定形态、岩性和分布特征,并以砂质岩为主的沉积岩体。与油气有关的砂岩体主要包括:冲积扇砂岩体、三角洲砂岩体、海岸砂岩体、河流砂岩体、浊积砂岩体和湖泊砂岩体等。油砂体为油田实际工作中的主要研究对象。

含油砂层中,只有渗透性好、含油饱和度高和能产出工业油流的砂岩体称为油砂体。油砂体常以两种形式出现:一种是在单油层内部呈不连续分布的透镜状油砂体,数目虽多,但相互不连通;另一种是各个砂体互相连通而形成复合的油砂体,又称连通体。这种连通体内分布着主要的油气储量,它也是开发的主要对象。