

“九五” 中国石油天然气集团公司级重点教材



# 油藏工程 原理与方法

姜汉桥 姚 军 姜瑞忠 主编

石油大学出版社

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材

# 油藏工程原理与方法

姜汉桥 姚 军 姜瑞忠 主编

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油藏工程原理与方法/姜汉桥主编. —东营:石油大学出版社,2000.9

ISBN 7-5636-1342-0

I. 油… II. 姜… III. 油田开采 IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 28285 号

油藏工程原理与方法

姜汉桥 姚 军 姜瑞忠 主编

责任编辑:郇云飞(电话 0546—8392565)

封面设计:傅荣治

出版者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址:<http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpres>

电子信箱:[upcpres@sunctr.hdpu.edu.cn](mailto:upcpres@sunctr.hdpu.edu.cn)

印刷者:石油大学印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:380千字

版 次:2003年3月第1版第4次印刷

印 数:3001~4500册

定 价:22.00元

## 前 言

油藏工程是石油工程的一个重要组成部分,是专门研究油田开发方法的一门综合技术学科。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的成果以及所提供的信息资料,对油藏开发方案进行设计和评价,以及应用有效的开采机理、驱替理论和工程方法来预测和分析油藏未来的开发动态,并根据这种预测结果提出相应的技术措施,以便获得最大的经济采收率。

自40年代以来,油藏工程理论和方法得到了迅速的发展。现代先进技术的发展和运用,使世界原油产量达到了顶峰。进入80年代后期,世界油气资源的新发现越来越少,油田开发的对象逐步转向难开发的地下资源,油气资源开采的技术难度、投资额度和风险程度日益增高。因此,油藏工程已发展为对多个油藏或整个油区如何制定及实施某种优化的油藏管理经营策略的进程。这就要求我们要运用先进的技术和信息手段,把握经济规律,依靠科学进步,寻求最佳的油藏管理方案并付之于实施,从而决胜于地下复杂的油藏和风云变幻的市场。

基于上述考虑,本书编写的内容分为五章。第一、二章主要阐述油藏工程设计所必须掌握的一些基本原理和方法、水驱开发理论和注水开发指标计算,为注水开发设计奠定科学依据;第三、四章阐述油藏动态监测、分析和预测的原理和方法;第五章介绍现代油藏经营管理基本概念、基本过程,并就油藏管理中几项支柱技术的发展作了简要介绍。

本书编写特点是:阐述基本原理与强调工程设计意识相结合;实用方法与先进技术介绍相结合;章节的相对独立性与全书的系统性相结合。另外,本书在阐述近年来国内外行之有效的新技术成果方面占了相当大篇幅,如断块油田的开发模式、示踪剂监测技术、生产测试技术、水平井动态分析、油藏经营管理等内容,从而实现本教材内容的先进性。

本书编者都是多年从事油藏工程教学和研究的教师。第一章、第二章、第五章由姜汉桥教授编写,第三章中第一至九节和第四章中第五节由姚军教授编写,第三章中第十、十一节和第四章中第一至四节由姜瑞忠副教授编写,习题由苏玉亮、谷建伟老师编写。全书得到了中国石油勘探与生产公司闰存章教授级高工和石油大学刘慧卿副教授的审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

在编写过程中,我们参考了大量的文献资料和书籍,其中一部分已在书后的参考文献中列出,在此,对这些作者和未被列出文献的作者表示深切谢意!

本书适用于石油工程本科学学生使用,也可供从事油气田开发工作者参考和培训之用。

由于编写人员水平有限,书中不妥之处在所难免,希望使用此教材的师生、读者提出批评并给予指正。

编 者  
2000年2月

# 目 录

第一章 油藏工程设计基础.....	(1)
第一节 油田勘探开发程序.....	(1)
第二节 油藏评价.....	(4)
第三节 开发层系划分与组合 .....	(14)
第四节 井网与注水方式 .....	(17)
第五节 油田开发方案报告编写 .....	(30)
第六节 复杂油田开发 .....	(32)
第七节 油田开发调整 .....	(40)
第二章 非混相驱替及注水开发指标计算 .....	(45)
第一节 一维不稳定驱替 .....	(45)
第二节 重力分异情况下的驱替 .....	(61)
第三节 底水锥进 .....	(70)
第四节 面积注水开发指标计算 .....	(77)
第五节 剩余油饱和度及其可流动性 .....	(82)
第六节 改善注水开发效果的水动力学方法简介 .....	(85)
第三章 油藏动态监测原理与方法 .....	(91)
第一节 试井及试井分析 .....	(91)
第二节 均质油藏试井分析方法 .....	(93)
第三节 有界地层的不稳态试井分析方法 .....	(98)
第四节 均质油藏试井分析应用实例.....	(108)
第五节 双重介质油藏的常规试井分析.....	(113)
第六节 垂直裂缝井的常规试井分析.....	(118)
第七节 水平井的常规试井分析方法.....	(121)
第八节 均质油藏钻杆测试(DST)分析.....	(125)
第九节 气井试井分析方法.....	(129)
第十节 现代试井分析方法简介.....	(135)
第十一节 油藏井间示踪剂动态分析方法.....	(139)
第十二节 生产测井技术在油田开发中的应用.....	(145)
附录 A 示踪剂流出曲线方程的推导 .....	(151)
附录 B 多层油藏的总示踪剂浓度方程的推导 .....	(152)
第四章 油藏动态分析方法.....	(154)
第一节 物质平衡方法.....	(154)
第二节 水驱特征曲线分析.....	(180)
第三节 产量递减分析.....	(188)

第四节	其他预测模型简介	(198)
第五节	水平井及产能评价	(202)
第五章	油藏管理	(207)
第一节	油藏管理的内涵	(207)
第二节	油藏管理的基本要素	(208)
第三节	油藏管理班子和协同作用	(209)
第四节	资料采集、分析和管理	(211)
第五节	油藏管理的基本过程	(214)
第六节	油藏管理的技术发展	(217)
思考题与习题		(220)
参考文献		(227)

# 第一章 油藏工程设计基础

一个油田在肯定了它的工业开采价值,初步探明了它的分布面积以后,就要着手进行油藏工程设计,确定开发部署,从而有计划地将油田投入开发。这一阶段的工作将在较短的时间内完成,但它将直接影响到油田全面开发工作的主动性和经济效益。因此这一阶段的工作是油田开发工作中极为重要的关键性工作。

随着对油田非均质性认识的加深,以及受商业价值的左右,人们越来越重视对油田合理开发程序的研究,最大限度地把油藏地质描述、油藏工程和其他有关各个学科协调起来形成强有力的管理体系。尤其是对于含油面积大、油层多、地下资料丰富的油田,应用这一管理体系制定合理的开发程序,就显得更加重要。这已被许多油气藏的成功开发实例所证实。本章将详细讲述和分析从油田勘探到投入开发的过程以及合理开发程序的部署。

## 第一节 油田勘探开发程序

所谓合理的开发程序,就是把从油田勘探到投入开发的过程分成几个阶段,把油藏描述研究、油藏工程研究以及其他的技术学科有机地结合起来,合理安排钻井、开发次序和对油藏的研究工作,尽可能用较少的井、较快的速度来取得对油田(藏)的全面认识,以及有关基础资料的获取,编制油田开发方案,指导油田逐步投入开发。

油田勘探开发是个连续的过程。就油田勘探开发整体而言,可以将整个油气田勘探开发过程划分为三个阶段,即区域勘探(预探)阶段、工业勘探(详探)阶段和全面开采阶段。

### 一、区域勘探(预探)

区域勘探是在一个地区(指盆地、坳陷或凹陷)开展的油气田勘探工作。其主要任务是从区域出发,进行盆地(或坳陷)的整体调查,了解地质概况,查明生、储油条件,指出油气聚集的有利地带,并进行油气地质储量的估算,为进一步开展油气田工业勘探指出有利的含油构造。

在区域勘探阶段内的工作可分为普查和详查。普查是区域勘探的主体,具有战略性;详查是在普查评价所指出的有利地区内进一步开展的调查工作。区域勘探的主要任务是在查明区域地质和生、储油条件的基础上,进一步查明控制油气聚集的二级构造带和局部构造的地质情况,为工业勘探指出有利的位置和方向。

### 二、工业勘探(详探)

工业勘探是在区域勘探所选择的有利含油构造上进行的钻探工作。其主要任务是寻找油气田和查明油气田,计算探明储量,为油气田开发做好准备。工业勘探过程可以分为构造预探和油田详探两个阶段。

构造预探简称预探。它是在详查所指出的有利含油构造上进行地震详查和钻探井。其主要任务是发现油气田及其工业价值,初步圈定出含油边界,为油田详探提供含油气面积。

油田详探简称详探。它是在预探提供的有利区域上,加密钻探,并加密地震测网密度。其主要任务是查明油气藏的特征及含油气边界,圈定含油气面积,提高探明储量,并为油藏工程设计提供全部地质基础资料,其中包括油气田构造的圈闭类型、大小和形态,含油层的有效厚度,流体物性参数及油层压力系统、油井生产能力等油藏参数资料。

要完成详探阶段的任务,必须运用各种方法进行多方面的综合研究,把勘探和开发的工作很好地结合起来,分阶段、有部署地使油田全面投入开发。为此,在详探阶段,要有次序、有步骤地开展各项工作。

### 1. 地震细测工作

地震细测工作主要是指在预探成果的基础上,配合钻探,加密地震测网密度。如江汉的王场油田,预探阶段地震测网密度 1 km;在详探阶段,地震测网密度加密到 500 m。通过对地震细测资料的解释,落实构造形态和其中断裂情况(包括主要断层的走向、落差、倾角等),从而为确定含油带圈闭面积、闭合高度等提供依据。

### 2. 打详探资料井

在详探阶段,最重要和最关键的工作之一是打详探资料井,直接认识地层。详探工作进展快慢、质量高低直接影响油田投入开发进度和开发设计的正确与否。因此对于详探资料井的数目的确定、井位的选择、钻井的顺序以及钻井过程中必须获取的资料等都应做出严格的规定,并作为详探设计的主要内容。

详探井的密度,应在初步掌握构造情况的基础上,以尽量少的井而又能准确地认识和控制全部油层为原则来确定。在一般的简单的构造上,井距通常在 2 km 以上;在复杂断块油田上,一口探井控制的面积可以达到 1~2 km<sup>2</sup> 甚至更小。详探资料井既要承担认识油层本身分布及变化的重要任务,又要承担兼顾探边、探断层的工作。在一些情况下,这些详探资料井可能是今后的生产井,因此要考虑与今后生产井网的衔接问题。

通过详探资料井的录井、取心、钻杆测试、测井解释等取得的资料,应进行详细的地层对比,对于油层的性质及分布,尤其是稳定油层的性质及分布必须搞清楚,以便为下一步布置生产井网提供地质依据。与此同时,还要对主要隔层进行对比,为划分开发层系提供依据。通过进行系统的取心及岩心分析以及分层试油工作,为了解分层产能和预测可采储量提供地质及工程参数。

### 3. 油井的试油和试采

试油是油田详探阶段中不可缺少的重要一环。判断油气田有没有工业价值? 储层的面积及生产能力如何? 这些问题要靠打详探井(或探井)并进行试油来回答。试油工作的主要任务是:了解油层及其流体性质,确定该油田的工业价值;为确定各个不同含油层面积、计算地质储量和确定油井合理工作制度提供必要的资料。试油资料包括:① 产量数据——油、气、水产量;② 压力数据——油层静压、流动压力、压力恢复数据、井口的油管及套管压力;③ 油、气、水的物性资料;④ 温度数据——井下温度和地温梯度。在油井完成后,把油、气、水从地层中诱到地面上来并经过专门测试取得各种资料的工作,就叫做试油。

试采是油田开发前必不可少的一个步骤,它可以为开发方案中某些具体技术界限和技术指标提出可行的确定办法。通常情况下试采是分单元按不同含油层系进行的。选择能够代表这一地区、这一层系特征的油井,按生产井要求试油后,以较高的产量较长期地稳定试采。试采井的工作制度,以接近合理工作制度为宜,不应过大或过小。试采期限的确定,视油田大小而有所不同。总的要求是要通过试采暴露出油田在生产过程中的矛盾,以便在开发方案中加以考



虑和解决。试采的主要任务是：

- (1) 认识油井生产能力，特别是分布稳定的主力油层的生产能力及其产量递减情况。
- (2) 认识油层天然能量的大小及驱动类型和驱动能量的转化。
- (3) 认识油层的连通情况和层间干扰情况。

(4) 认识生产井的合理工艺技术和油层改造措施。此外，还应通过试采落实某些影响生产的地质因素，如边界影响、断层封闭情况等，为今后合理布井和研究注采系统提供依据。为此，有时除了生产性观察外，还必须进行一些专门的测试，如探边测试、井间干扰试验等。

#### 4. 开辟生产试验区

从地震细测、打详探资料井到油井试油试采，获得了对油藏的地质情况和初步生产动态的认识，以及进行油藏工程设计、编制开发方案必备的基础。但仅此还不够，为了制定方案还必须预先掌握和了解在正规井网进行正式开发过程中所采取的重大措施和决策是否正确和完善，并掌握油层的详细变化规律和开采特点，而这些问题单依靠这些工作是不能完全解决的。因此对于一个油田来讲，开展多方面的生产试验，而且往往是大规模的开发试验，是必不可少的。

对于准备开发的大油田，在详探程度较高和地面建设条件比较有利的地区，首先划出一块面积，用正规井网正式开发作为生产试验区，开展各种开发生产试验。大油田开辟生产试验区，中、小油田开辟试验井组，裂缝性碳酸盐岩油田或断块油田可进行单井生产试验。

生产试验区是油田上第一个投入生产的开发区。它除了担负进行典型解剖的任务外，还有一定的生产任务。因此在选择时应考虑油井生产能力、地面建设等条件，以保证生产试验研究和生产任务都能同时完成。

##### 1) 开辟生产试验区的原则

- (1) 生产试验区开辟的位置和范围对全油田应具有代表性。通过试验区认识的油层分布规律、流体运动特点对全油田具有较为普遍的意义。
- (2) 试验区应具有相对的独立性，把试验区对全油田合理开发的影响减小到最小程度。
- (3) 试验区要具有一定的生产规模。
- (4) 试验区的开辟还应尽可能考虑地面建设。

##### 2) 开辟生产试验区的主要任务

开辟生产试验区的主要任务是：研究油层的地质情况，搞清各小层面积及分布形态、厚度、储量及非均质情况，隔层的性质和分布规律；研究井网系统和布井方式及其对储量的控制程度，以及开发层系划分的标准；研究生产动态规律和合理的采油速度，以及适用的采油工艺技术。生产试验任务还必须根据各油田的不同地质条件和生产特点确定针对该油田的一些特殊任务：如对于有天然能量的油田来说，确定转注时间及合理注采比就必须加以研究；而其他如断层对油水运动的影响，高渗透层、裂缝、特低渗透层、稠油层等的开采特点，都应结合本油田的实际情况加以研究。

##### 3) 开辟生产试验区试验项目的研究

开辟生产试验区的试验项目的研究，应以研究开发部署中的基本问题，或揭示油田生产动态中的基本问题，或揭示油田生产动态中的基本规律为目标来确定。针对不同油田的地质特点以及人们可能采用的开采方式，各油田所需要进行的开发试验项目可能差别很大，不能同样对待。下面将列出一些重要和基本的内容：

- (1) 油田各种天然能量试验 这些能量包括弹性能量、溶解气的能量、边水和底水能量；应认识其对油田产能大小的影响，对稳产的影响，以及各种能量及驱动方式的转化关系等。

(2) 井网试验 包括各种注采井网形式及井网密度所能取得的最大产量和合理生产能力,对油层的控制程度以及对采收率和技术经济效果的影响。

(3) 提高采收率研究 不同开发方式下各类油层的层间、平面和层内的干扰情况,注水波及体积和驱油效率,以及各种提高采收率方法的适用性。

(4) 各种增产措施及方法试验 作为提高产能的开发措施应包括压裂、酸化、卡堵水、放大压差、强注强采等,分析其对增加产量,提高储量动用程度,改善开发效果的作用。

总之,各种开发试验都应针对油田实际情况提出,在详探、开发方案制订和实施阶段应集中力量进行,而在油田开发整个过程中同样必须始终坚持进行开发试验,且坚持使试验走在前面,以取得经验指导全油田开发。

### 三、油田正式投入开发

油田详探阶段是油田勘探开发整个程序中一个独立的重要阶段。它是保证油田能够科学而合理地开发所必经的阶段,但是又必须考虑各阶段之间的衔接和交替。对于整装的大油田,根据详探资料井的钻探和生产试验区的解剖,虽然基本掌握了油层性质的变化特征和生产动态,但还存在较大的局限性。因为一般详探资料井的密度为每口井  $1\sim 2\text{ km}^2$ ,在这样大的井网下,一般很难掌握到它们的非均质特点。为了解决这个问题,可以采用部署基础井网的办法。

基础井网是以某一主要含油层为目标而首先设计的基本生产井和注水井,是开发区的第一套正式开发井网。基础井网的主要任务有两个:

一是合理开发主力油层,建成一定的生产规模。二是兼探开发区的其他油层,解决探井、资料井所没有完成的任务,摸清这些油层的分布状况、物理性质和非均质特点,为下一步开发这些油层提供可靠的地质依据。

基础井网的部署要求是:

(1) 基础井网的部署应该在开发区总体开发设计的基础上进行,要考虑到将来不同层系井网的相互配合和综合利用,不能孤立地进行部署。

(2) 基础井网在实施上要分步进行,基础井网钻完后,暂不射孔,及时进行油层对比,摸清地质情况,掌握其他油层特点。必要时,修改和调整原定方案。然后再对基础井网射孔投产。

综上所述,合理的勘探开发步骤,就是如何认识油田和如何开发油田的工作程序。科学而合理的油田勘探开发步骤可以使我们对油田的认识逐步提高,而同时又使开发措施不断落实。但对于复杂断块油田而言,以上所述的油田勘探开发程序则不适用,必须进行滚动勘探开发。

## 第二节 油藏评价

### 一、油(气)藏类型及其模型

油藏是指油在单一圈闭中具有同一压力系统的基本聚集。如果在一个圈闭中只聚集了石油,称为油藏;只聚集了天然气,称为气藏。一个油藏中可以有几个含油砂层时,称为多层油藏。

#### 1. 油(气藏)的特征参数

油藏由含油岩石和油藏流体两部分组成。其中油藏流体——油、气、水——在油藏中是按密度大小呈有规律的分布。油藏规模和流体在平面上的分布如图 1-1 所示。

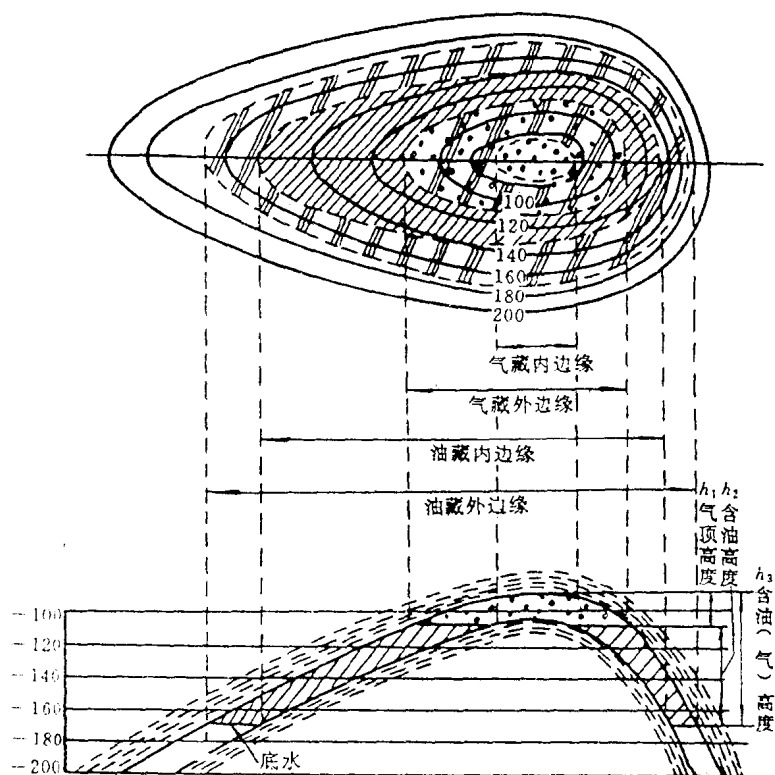


图 1-1 背斜油藏中油气水分布示意图

从图中可以得到以下几个参数：

(1) 含油边缘：指油水接触面与含油层顶面的交线。这是水和油的外部分界线。对气顶来说则称为气顶边缘。

(2) 含水边缘：指油水接触面与含油层底面的交线。它是油和水的内部分界线，一般情况下，在此线以内只有油，而没有可流动的水。

(3) 油水过渡带：指含油边缘与含水边缘之间的地带。

(4) 含油面积：含油边缘所圈定的面积称为含油面积。

(5) 边水和底水：在含油边缘内的下部支托着油藏的水，称为底水；而在含油边缘以外衬托着油藏的水，称为边水。

(6) 含油(气)高度：指油、水接触面与油藏最高点的海拔高差。

## 2. 油(气)藏的分类

油藏的分类方法很多，根据油藏成因的不同可把油藏分为三类：

(1) 构造油藏：油(气)聚集在由于构造运动而使地层变形(褶皱)或变位(断层)所形成的圈闭中，称为构造油(气)藏。这类油藏常见的有背斜油藏、断块油藏。

(2) 地层油藏：油(气)聚集在由于地层超覆或不整合覆盖而形成的圈闭中，称为地层油(气)藏。其中古潜山油藏是最常见的一种。

(3) 岩性油藏：油(气)聚集在由于沉积条件的改变导致储集层岩性发生横向变化而形成的岩性尖灭和砂岩透镜体圈闭中，称为岩性油(气)藏。其中常见的有砂岩透镜体、岩性尖灭和生物礁块油(气)藏。

除了上述三大基本类型的油(气)藏之外,还有一些隐蔽的或不明显的油气藏,称为特殊油气藏。

### 3. 油田开发模型

所有构成油藏的岩石是不均质的,孔隙结构十分复杂。但所有这些储油介质结构可分为粒间孔隙结构、裂缝结构、溶洞结构和它们的复合结构。油(气)不仅被孔隙砂岩所饱含,而且也被饱含于石灰岩、白云岩甚至火成岩的裂缝、微裂缝、洞穴中。建立油藏地质模型就是将储层介质结构特征和油藏流体在三维空间的变化和分布规律加以定量描述。油藏地质模型的建立是进行油藏经营管理的基础。

根据油藏开采过程的特点,可以将油藏开采过程(流体渗流)模型分为气藏模型、黑油模型和组分模型。气藏模型主要是描述气田开采动态特征。黑油模型描述了油质较重的油藏类型模型,通常认为在油藏开采过程中相的变化只在油、气两相之间进行,如包括气溶于油或气从油中逸出现象。组分模型是指油质较轻、气体较富的油气藏类型模型,如挥发性油藏(轻质油)或凝析气藏。能正确地反映油藏性质和开采过程的油藏地质模型和油藏开采过程模型的任意组合,称为油田开发模型或称为油藏模拟模型。该模型可以帮助人们正确进行油藏工程分析和决策,并有效地指导如下工作:

- (1) 确定不同开发条件下的油藏动态。
- (2) 进行不同注采井网和注采井距下的开发方案优化设计。
- (3) 确定各种可能的开发策略和调整方案(如钻加密井、钻补充井、扩边井、改变开采方式、调整注采系统等)的开发效果。

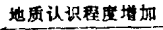
另外还有一种经验统计型油田开发模型,它是建立在对生产数据和实验资料进行整理的基础上的。经验统计模型可用来估算油田稳产年限、产量递减规律、含水变化规律、采收率等。这是一种实用而又简便的分析油田动态的方法。

## 二、储量计算

油气田储量是石油和天然气在地下的蕴藏量,它是油气田勘探综合评价的重要成果之一,也是制订油田开发方案、确定油田建设规模和投资的依据。

一个油田从勘探到开发要经历几个不同的阶段,随着各阶段的不断深入,人们对油田地质规律的认识也不断深化,因此计算的储量和核实储量的级别也不断提高。目前我国油气储量分类分级法见表 1-1 所示。

表 1-1 油气储量分类分级表

探 明 储 量			控制储量	预测储量
已开发探明储量 (I类)	未开发探明储量 (I类)	基本探明储量 (II类)		
				

由于勘探开发各个阶段对油气藏的认识程度不同,油气储量可分为探明储量、控制储量和预测储量三级。各级储量是一个与地质认识、技术经济条件有关的变数。各级储量既反映了其勘探开发阶段的工作成果,又能作为指导下一步勘探开发部署的依据。油田勘探开发全过程实

实际上是对地下油气藏逐步加深认识的过程,也是储量计算逐步提高和接近于客观实际的过程。这个过程既有连续性,又有阶段性。不同勘探开发阶段所要求的储量精度不同。即使在油田开发过程中,也应根据油田生产动态资料,应用各种开发动态分析方法,定期对油田的地质储量和可采储量进行复核。人们根据这一认识,提出了一个计算可采储量的模式图(见图 1-2)。

图 1-2 表示了一个油田在不同开发阶段的可采储量计算方法以及相对风险性的一般模式:① 一个油田在开发过程中的不同阶段;② 在不同开发阶段,估算可采储量的方法;③ 可采储量估算变化幅度,通常情况下,估算值随油田开发深化和对油气藏的加深认识而逐步接近实际最终可采储量;④ 一般的产量变化曲线;⑤ 在应用可采储量估算方法中的风险。要注意,即使在油田开发后期,估算的可采储量变得很精确,此时的储量估算仍然可能有很大的风险。

储量估算方法通常分为三类:类比法;容积法;动态法。动态方法一般分为数值模拟研究、物质平衡计算和递减趋势分析。类比法一般用在油气藏识别阶段,如图 1-2 中 AB 阶段所示。

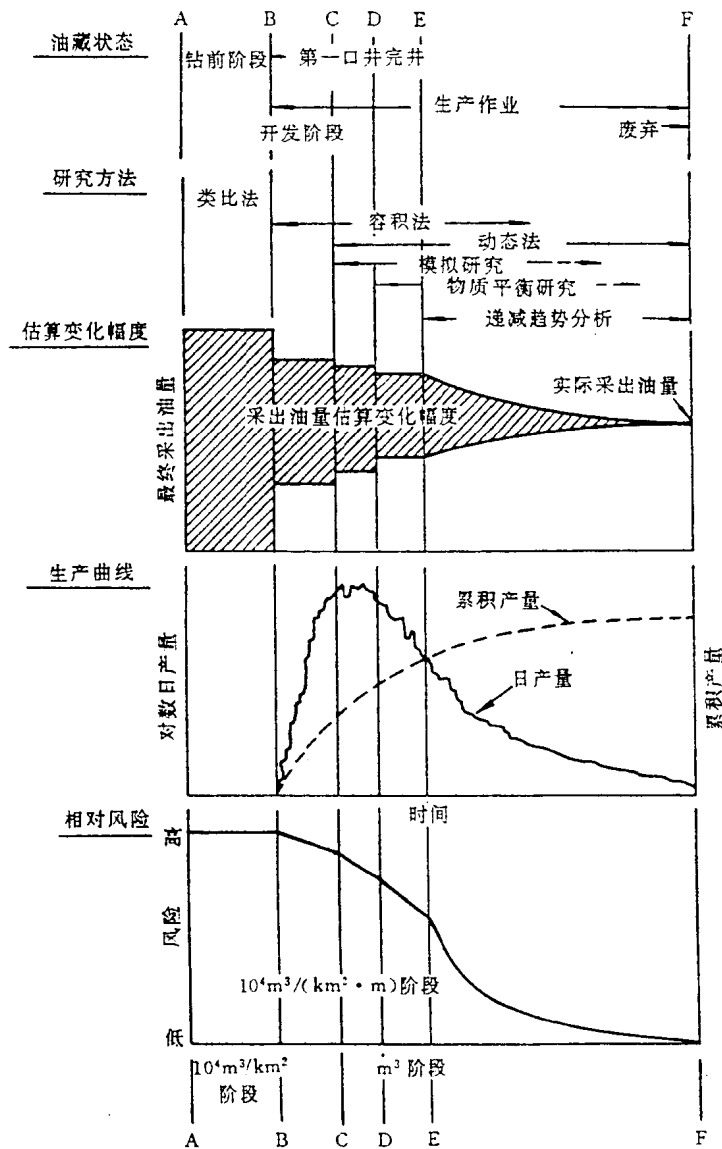


图 1-2 储量测算模式图

在油气田的储量计算中,容积法仍然是最基本的方法。有关利用生产动态资料估算油田地质储量的问题,将在本书第四章中加以阐述。

### 1. 计算油田地质储量

油田的地质储量表示为:

$$N = 100 Ah\phi(1 - S_{wi})\rho_o/B_{oi} \quad (1-1)$$

式中  $N$ ——原油地质储量,  $10^4$  t;  
 $A$ ——油田的含油面积,  $\text{km}^2$ ;  
 $h$ ——平均有效厚度, m;  
 $\phi$ ——平均有效孔隙度, 小数;  
 $S_{wi}$ ——油层平均原始含水饱和度, 小数;  
 $\rho_o$ ——平均地面原油密度,  $\text{t}/\text{m}^3$ ;  
 $B_{oi}$ ——原始原油体积系数。

地层原油中的原始溶解气地质储量表示为:

$$G_s = 10^{-4} N \cdot R_{si} \quad (1-2)$$

式中  $G_s$ ——溶解气的地质储量,  $10^8$   $\text{m}^3$ ;  
 $R_{si}$ ——原始溶解气油比,  $\text{m}^3/\text{t}$ 。

油田的储量丰度( $\Omega_o$ )和单储系数( $SNF$ )分别表示为:

$$\Omega_o = N/A = 100h\phi(1 - S_{wi})\rho_o/B_{oi} \quad (1-3)$$

$$SNF = N/(Ah) = 100\phi(1 - S_{wi})\rho_o/B_{oi} \quad (1-4)$$

### 2. 计算气田地质储量

气田的原始地质储量表示为:

$$G = 0.01Ah\phi S_{gi}/B_{gi} \quad (1-5)$$

式中  $G$ ——气田的地质储量,  $10^8$   $\text{m}^3$ ;  
 $S_{gi}$ ——平均原始含气饱和度, 小数;  
 $B_{gi}$ ——原始的天然气体积系数, 表示为:

$$B_{gi} = \frac{p_{sc} Z_i T}{p_i T_{sc}} \quad (1-6)$$

式中  $p_i$ ——原始油层压力, MPa;  
 $p_{sc}$ ——地面标准压力, 取 0.101 MPa;  
 $T_{sc}$ ——地面标准温度, 取 293 K;  
 $T$ ——油层温度, K;  
 $Z_i$ ——原始气体压缩因子。

将式(1-6)代入式(1-5)得:

$$G = 0.01Ah\phi S_{gi} \frac{T_{sc}}{T} \frac{1}{p_{sc}} \frac{p_i}{Z_i} \quad (1-7)$$

式中  $p_i/Z_i$ ——原始视油层压力, MPa。

根据经济技术条件,当确定了气藏的废弃压力之后,可由下式计算定容封闭气藏的可采储量:

$$G_R = 0.01Ah\phi S_{gi} \frac{T_{sc}}{T} \frac{1}{p_{sc}} \left( \frac{p_i}{Z_i} - \frac{p_a}{Z_a} \right) \quad (1-8)$$

式中  $G_R$ ——定容封闭气藏的可采储量,  $10^8 \text{ m}^3$ ;

$p_a$ ——废弃压力, MPa;

$p_a/Z_a$ ——废弃视油层压力, MPa。

气田的地质储量丰度为:

$$\Omega_g = 0.01h\phi S_{gi} \frac{T_{sc}}{T} \frac{1}{p_{sc}} \frac{p_i}{Z_i} \quad (1-9)$$

气田的单储系数为:

$$SGF = 0.01\phi S_{gi} \frac{T_{sc}}{T} \frac{1}{p_{sc}} \frac{p_i}{Z_i} \quad (1-10)$$

### 3. 凝析气田储量

由于凝析气田在原始油层条件下呈单相气相状态。所以计算原始地质储量时, 首先应将原始烃类气体的地质储量计算出来。在此基础上再计算原始凝析油的地质储量。有关凝析气田原始地质储量的计算方法, 国内外文献资料介绍得比较多, 归纳起来大致有四类: 容积法、探边测试法、物质平衡法、生产数据统计法。考虑到初期阶段资料的完善程度, 容积法是一种常用且有效的方法。

#### 1) 凝析气藏中原始地质储量

由气体状态方程, 在原始油层条件下, 凝析气藏中天然气和凝析油的总物质的量为:

$$n_t = \frac{p_i V_p}{Z_i RT} \quad (1-11)$$

式中  $n_t$ ——凝析气藏中流体总物质的量, kmol;

$V_p$ ——凝析气藏的原始孔隙体积,  $\text{m}^3$ ;

$R$ ——通用气体常数,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

在标准条件(0.101 MPa 和  $20^\circ\text{C}$ )下, 1 kmol 气体所占的体积为  $24.056 \text{ m}^3$ , 因此,  $n_t$  摩尔凝析气藏中的流体所占的体积为:

$$G = \frac{24.056 \times 10^{-2} Ah\phi S_{gi} p_i}{Z_i RT} \quad (1-12)$$

已知  $R=0.0083159 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ , 将其代入式(1-12)得:

$$G = \frac{28.9277 Ah\phi S_{gi} p_i}{Z_i T} \quad (1-13)$$

#### 2) 凝析气藏中天然气的原始地质储量

若已知凝析气藏在稳定生产条件下的生产气油比为  $GOR$ , 即在地面产生  $1 \text{ m}^3$  凝析油时, 所产生天然气的体积是  $GOR \text{ m}^3$ 。因此地面产生  $GOR \text{ m}^3$  天然气的物质的量为:

$$n_g = \frac{GOR}{24.056} \quad (1-14)$$

式中  $n_g$ ——天然气的物质的量, kmol;

$GOR$ ——生产气油比,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

在凝析气藏中, 采出  $1 \text{ m}^3$  凝析油的物质的量为:

$$n_o = \frac{1000 \gamma_o}{M_o} \quad (1-15)$$

式中  $n_o$ ——凝析油的物质的量, kmol;

$\gamma_o$ ——凝析油的相对密度;

$M_o$ ——凝析油的相对分子质量,可由如下相关经验公式确定:

$$M_o = \frac{44.29 \gamma_o}{1.03 - \gamma_o} \quad (1-16)$$

地面产出天然气的摩尔分数为:

$$f_g = \frac{n_g}{n_g + n_o} = \frac{GOR}{GOR + \frac{24\ 056 \gamma_o}{M_o}} \quad (1-17)$$

式中  $f_g$ ——地面产出天然气的摩尔分数。

因此,在总的原始地质储量中,天然气的原始地质储量由下式计算:

$$G_d = G f_g \quad (1-18)$$

式中  $G_d$ ——凝析气藏中天然气的原始地质储量,  $10^8 \text{ m}^3$ 。

3) 凝析气藏中凝析油的原始地质储量

在凝析气藏中凝析油的原始地质储量为:

$$N_d = \frac{10^4 G_d \gamma_o}{GOR} \quad (1-19)$$

式中  $N_d$ ——凝析油原始地质储量,  $10^4 \text{ t}$ 。

### 三、油藏的驱动方式及其开采特征

油藏的驱动方式是全部油层工作条件的综合。各种驱动方式,也是油藏中排油的主要动力来源。这种动力可以来自自然界,它与油藏的地质条件有关;也可以来自人工补充能量,向油层注入工作剂。要建立哪一种驱动方式,应根据油田开发需要和油藏的地质条件来确定。

驱动方式对于油田开发来说具有很大意义,它将确定油田开采的最终采收率,而且在油藏工程设计中,合理的井网布置、油井工作方式以及地层压力保持水平等在一定程度上要由驱动方式来确定。

在自然地质条件和开采条件下,在油藏中驱油的力一般有以下几种:

- (1) 油藏中流体和岩石的弹性能。
- (2) 溶解于原油中的天然气膨胀能。
- (3) 边水和底水的压能和弹性能。
- (4) 气顶气的膨胀能。
- (5) 重力能。

上述某一驱动方式是指油层在开发过程中,某一种能量起主导驱油作用。油藏的驱动能量不同,开采方式则不同,从而在开发过程中产量、压力、气油比等主要开发指标也有不同的变化特征。它们是表征驱动方式的主要因素,所以可以从它们的变化关系来判别驱动方式。下面对不同的驱动方式加以讨论。

#### 1. 弹性驱动

在油藏无边水或底水,又无气顶,且原始油层压力高于饱和压力时,随着油层压力的下降,依靠油层岩石和流体的弹性膨胀能驱油的方式称为弹性驱动。这类油藏一般为封闭油藏和断块油藏。这类油藏在开采时,随着油层压力的降低,地层将不断释放出弹性能将油驱向井底。如果保持井底流压不变,油井产量将不断下降。其开采特征曲线如图 1-3 所示。

#### 2. 溶解气驱

在弹性驱阶段,当油层压力下降至低于饱和压力时,随着油层压力的进一步降低,原处于



溶解状态的气体将分离出来,气泡的膨胀能将原油驱向井底。就其机理来说,溶解气驱属于弹性驱动的一种,但其弹性能主要来自气泡的膨胀,而不是来自液体和岩石的膨胀。

形成溶解气驱的油藏应无边水、底水或注入水,无气顶,或有边水但很不活跃,油层压力低于饱和压力。这类油藏是封闭性的(如岩性油藏)或与外部水体连通性极差。

随着井底流压的急剧下降,井底附近严重脱气,油层孔隙中便很快形成混合流动,随着压力进一步降低,逸出的气量增加。由于气体的流度远大于原油的流度,气体将抢先流入井底,使驱油的动力很快丧失。同时,原油中的溶解气逸出后油的粘度增加,使油的流度进一步恶化。这在生产中表现为生产气油比急剧上升,油井产量下降。当油层中能量极大地消耗后,生产气油比将以很快的速度下降。其开采特征曲线如图 1-4 所示。

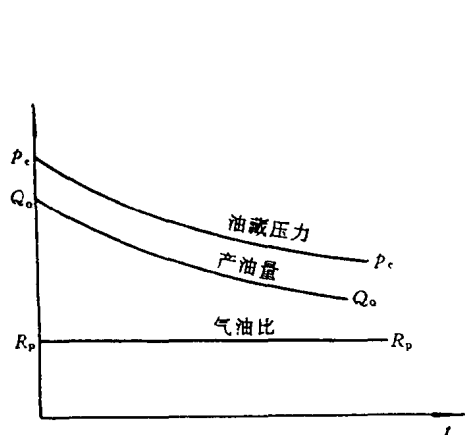


图 1-3 弹性驱动油藏开采特征曲线

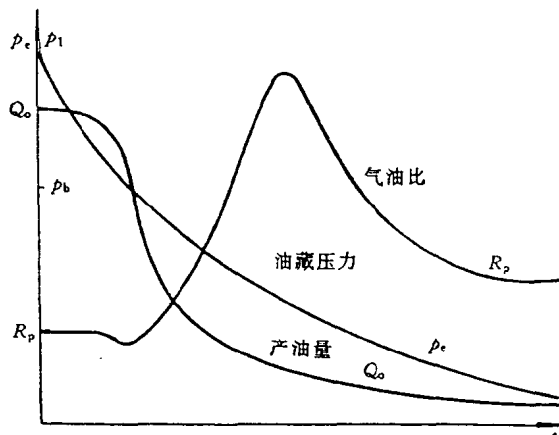


图 1-4 溶解气驱油藏开采特征曲线

纯溶解气驱油田是较少的,但溶解气驱常伴随着其他驱动类型而同时出现。从机理上说,只要油藏中某一点的压力降到饱和压力以下,该处就会出现溶解气驱,但这时油藏从总体上可能仍为另一种驱动方式所控制。

### 3. 水压驱动

当油藏与外部的水体相连通时,油藏开采后由于压力下降,使其周围水体中的水流入油藏进行补给,这就是水压驱动。水压驱动分刚性水驱和弹性水驱两种。

#### 1) 刚性水驱

刚性水驱是以油藏压力基本保持不变为其特征,因此凡与压力有关的参数都是常数,而不是时变参数,这时的流动属于稳态流。驱动能量主要是边水的重力作用。

形成刚性水驱的条件是:油层与边水或底水相连通;水层有露头,且存在着良好的供水水源,与油层的高差也较大;油层都具有良好的渗透性;油水层之间连通性较好。因此,在该驱动方式下,能量供给充足,其水侵量完全补偿了采液量;总压降越大,采液量也越大。通常,也可以把注水开发看成刚性水驱(当注采比等于1时)。

油藏进入稳定生产阶段以后,由于有充足的边水、底水或注入水,能量消耗能得到及时补充,所以在整个开发过程中,油层压力保持不变。当边水、底水或注入水推至油井后,油井开始见水,含水将不断增加,此时产油量开始下降,但产液量可保持不变。由于油层压力保持不变,生产气油比等于原始溶解气油比,其开采特征曲线如图 1-5 所示。

#### 2) 弹性水驱

弹性水驱主要依靠含油区和含水区压力降低而释放出的弹性能量来进行开采。当压力降