



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 油藏工程原理与方法

(第3版)

• 姚 军 谷建伟 吕爱民 主编 •



中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油工业出版社, 2016.8

石油工业出版社, 2016.8

石油工业出版社

石油工业出版社

石油工业出版社

石油工业出版社, 2016.8

石油工业出版社, 2016.8

# 油藏工程原理与方法

(第3版)

姚军 谷建伟 吕爱民 主编



中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

油藏工程原理与方法/姚军,谷建伟,吕爱民主编.

—3版. —东营:中国石油大学出版社,2016.5

ISBN 978-7-5636-3492-7

I. ①油… II. ①姚…②谷…③吕… III. ①油藏工程—研究 IV. ①TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 123617 号

# 油藏工程原理与方法

(第三版)

姚军 吕爱民 谷建伟 主编

书 名: 油藏工程原理与方法  
作 者: 姚 军 谷建伟 吕爱民

责任编辑: 穆丽娜 张 廉 (电话 0532—86981531)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

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](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

印 刷 者: 青岛国彩印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531,86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张:24.5 字数:592 千字

版 次: 2016 年 5 月第 3 版第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

## 前言

Preface

五洲出版

第一版

1991年11月

## 第一章 油田开发设计基础

油田工程是石油工程的重要组成部分,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及其提供的信息资料,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及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,以获得最大的经济采收率。

自20世纪40年代以来,油藏工程理论和方法得到了迅速发展。现代先进技术的发展和应用,使世界原油产量达到了顶峰。进入20世纪80年代后期,世界油气资源的新发现越来越少,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,油藏工程已发展到对多个油藏或整个油区制定及实施某种优化的油藏管理经营策略的研究。这就要求我们正确运用先进的技术和信息手段,把握经济规律,依靠科技进步,寻求最佳的油藏管理方案并付诸实践,达到经济有效开发油藏的目的。

基于上述考虑,结合原教材内容,将本书编写的内容分为七章。第一章和第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;第三章和第四章阐述油藏动态监测原理与方法以及油藏动态分析方法;第五章主要介绍油田开发调整的原理和方法;第六章对常见的稠油油藏、断块油藏、低渗透油藏、凝析气藏和碳酸盐岩油藏等复杂油藏的开发原理和开发技术进行阐述;第七章以聚合物驱为例对化学驱油藏工程方法进行简要介绍。

本书的编写特点是:阐述基本原理与强调工程设计应用相结合;介绍实用方法与讲解先进技术相结合;章节的相对独立性与全书的系统性相结合。另外,本书在介绍近年来国内行之有效的新技术成果方面用了相当大的篇幅,如断块油田开发模式、凝析气藏开发技术、水平井动态分析、智能油田等,从而保证内容的先进性。

本书编者均具有多年油藏工程教学和科学研究经验。其中,第三章由姚军教授编写;第一章、第五章、第六章(第一节、第二节和第三节)、第七章和附录由谷建伟教授编写;第二章、第四章、第六章(第四节和第五节)由吕爱民副教授编写。全书由姚军教授统稿。

本书编写过程中参考了大量的资料和书籍,其中一部分已在书后的参考文献中列出,在此谨对这些文献的作者和未被列出文献的作者表示深切的谢意!

本书适用于石油工程本科学生学习使用,也可供从事油气田开发的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,希望使用本书的师生、读者提出批评并给予指正。

中国书号 CIP 数据核字(2016)第 123617 号

编者

2015 年 12 月

本书共分五章,第一章介绍油藏工程概论,第二章介绍油藏工程地质学,第三章介绍油藏工程地球物理学,第四章介绍油藏工程渗流力学,第五章介绍油藏工程数值模拟。本书可作为石油工程专业及相关专业本科生的教材,也可供从事油藏工程工作的工程技术人员参考。

# 目录

## Contents

第一章 油田开发设计基础	1
第一节 油田勘探开发程序	1
第二节 油(气)藏评价	8
第三节 油(气)藏储量计算	11
第四节 油藏的驱动方式与开采特征	18
第五节 开发层系划分与组合	23
第六节 井网与注水方式	31
第七节 油田方案报告编写	52
思考题	57
第二章 开发指标概算原理与方法	59
第一节 油井产能计算方法	59
第二节 行列注水开发指标概算方法	64
第三节 面积注水开发指标概算方法	73
第四节 底水锥进的预测及控制方法	86
第五节 水侵量计算原理与方法	93
思考题	107
第三章 油藏动态监测原理与方法	108
第一节 试井分析概述	108
第二节 稳定试井分析方法	112
第三节 不稳定试井相关的基本概念	121

第四节	均质油藏试井分析方法 .....	129
第五节	有界均质油藏试井分析方法 .....	147
第六节	均质油藏垂直压裂井试井分析 .....	159
第七节	天然裂缝性油藏试井分析方法 .....	167
第八节	径向复合油藏试井分析方法 .....	184
第九节	水平井试井分析方法 .....	193
第十节	其他试井分析方法简介 .....	202
第十一节	油藏井间示踪剂动态分析方法 .....	206
思考题	.....	212
<b>第四章</b>	<b>油藏动态分析方法 .....</b>	<b>222</b>
第一节	物质平衡方法 .....	222
第二节	水驱特征曲线及其应用 .....	230
第三节	产量递减分析 .....	236
第四节	水驱油田主要技术指标的确定方法 .....	248
第五节	油田采收率的影响因素及预测方法 .....	260
思考题	.....	265
<b>第五章</b>	<b>油田开发调整 .....</b>	<b>267</b>
第一节	剩余油分布规律及其特征 .....	267
第二节	动态分析 .....	276
第三节	油田开发调整 .....	279
第四节	改善油田开发效果的水动力学方法 .....	289
思考题	.....	297
<b>第六章</b>	<b>复杂油藏开发方法 .....</b>	<b>298</b>
第一节	稠油油藏开发方法 .....	298
第二节	复杂断块油田开发方法 .....	309
第三节	低渗透油藏开发方法 .....	314
第四节	凝析气藏开发方法 .....	321
第五节	碳酸盐岩油藏开发方法 .....	329
思考题	.....	339
<b>第七章</b>	<b>聚合物驱油藏工程研究 .....</b>	<b>340</b>
第一节	化学驱提高采收率方法筛选 .....	340
第二节	聚合物驱油藏工程研究 .....	343
思考题	.....	359

附录一	平面径向流无限大天然水域的 $Q(t_D)$ 与 $t_D$ 关系表 .....	360
附录二	平面径向流有限封闭水域系统不同 $r_D$ 值的 $Q(t_D)$ 与 $t_D$ 关系表 .....	363
附录三	油气田开发基本概念 .....	367
附录四	常用参数单位制对照表 .....	376
附录五	公式单位制换算实例 .....	377
附录六	油藏工程常用单位换算关系 .....	378
参考文献	.....	380

一个油田在确定了其工业开采价值,初步探明了其分布面积以后,就要着手进行油田工程设计,确定油田开发方案,从而有计划地将其投入开发。

油田的正规开发一般要经历开发前的准备、开发方案设计、开发方案的调整与完善三个大的阶段。在这三个阶段中,又包括初探、详探、开发试验、储量计算、开发层系划分、井网部署、开发方式优选、注采方案设计、井网调整、层系调整、注采调整等多个过程。对于油田开发过程中的各个开发阶段或者过程,都需要采用多种方法对油藏进行研究和分析,其目的是全面掌握地下油藏特征,优选最佳的开发策略,特别是提高开发效果。因此,油田开发设计贯穿于整个油田开发过程中,是非常重要的工作。尤其是在目前的开发情况下,新发现的油藏一般都是地质情况复杂、流体性质特殊的油藏,已开发油藏大部分进入高含水开发期,受商业价值的影响,油田开发模式越来越严峻,开发难度越来越大。基于以上原因,需要石油科技工作者采用多种先进的技术,深入掌握地下情况,并且需要多学科和多技术的协同研究,因此油田开发设计成为整个油田开发过程中最重要的一个环节。

本章将详细讲述和分析油田从勘探到投入开发的过程以及整个开发过程中涉及的基本研究内容。

## 第一节 油田勘探开发程序

一个油田从发现到开发是一个逐渐进行的过程,一般情况下要遵从合理的开发程序:合理开发程序是指将油田从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工程技术有机地结合起来,合理安排钻井、开发次序和对油藏的研究分析工作,争取用较少的井、较快的速度获得对油藏(量)的全面认识,并编制油田开发方案,指导油田逐步投入开发。

油田勘探开发是一个连续的过程。就油田勘探开发整体而言,可以将整个油田勘探开发过程划分为区域勘探(预探)阶段、工业勘探(详探)阶段和正式投入开发阶段。

### 一、区域勘探(预探)阶段

区域勘探是在一个地区(盆地或场站)开展的油气田勘探工作。它的主要任务是从地质出发,进行盆地(或场站)的整体调查,了解地质概况,查明生、储油条件,查明油气聚集



# 第一章 油田开发设计基础

一个油田在确定了其工业开采价值,初步探明了其分布面积以后,就要着手进行油藏工程设计,确定油田开发方案,从而有计划地将其投入开发。

油田的正规开发一般要经历开发前的准备、开发方案设计、开发方案的调整与完善三个大的阶段。在这三个阶段中,又包括初探、详探、开发试验、储量计算、开发层系划分、井网部署、开发方式优选、注采方案设计、井网调整、层系调整、注采调整等多个过程。对于油田开发过程中的每个开发阶段或者过程,都需要采用多种方法对油藏进行研究和分析,其目的是准确掌握地下油藏特征,优选最佳的开发策略,达到最优的开发效果。因此,油田开发设计贯穿于整个油田开发过程中,是非常重要的工作。尤其是在目前的开发情况下,新发现的油藏一般都是地质情况复杂、流体性质特殊的油藏;已开发油藏大部分进入高含水开发期;受商业价值的影响,油田开发形式越来越严峻,开发难度越来越大。基于以上原因,需要石油科技工作者采用多种先进的方法和技术,深入掌握地下情况,并且需要多学科和多技术的协同研究,因此油田开发设计成为整个油田开发过程中最重要的一个环节。

本章将详细讲述和分析油田从勘探到投入开发的过程以及整个开发过程中涉及的基本研究内容。

## 第一节 油田勘探开发程序

一个油田从发现到开发是一个逐渐进行的过程,一般情况下要遵从合理的开发程序。合理开发程序是指将油田从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工程技术有机地结合起来,合理安排钻井、开发次序和对油藏的研究分析工作,争取用较少的井、较快的速度获取对油田(藏)的全面认识,并编制油田开发方案,指导油田逐步投入开发。

油田勘探开发是一个连续的过程。就油田勘探开发整体而言,可以将整个油田勘探开发过程划分为区域勘探(预探)阶段、工业勘探(详探)阶段和正式投入开发阶段。

### 一、区域勘探(预探)阶段

区域勘探是在一个地区(盆地或坳陷)开展的油气田勘探工作。它的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初步估算,为进一步开展油气田工业勘探指出有利的含油构造。

该阶段的主要工作可以分为普查和详查两部分。普查是区域勘探的主体,具有战略性,其目的是了解盆地(或坳陷)的地层状况,判断是否具备生油环境和储油条件,并进一步分析油气聚集的可能地带。详查是在普查评价所指出的油气聚集带内进一步开展的调查工作,进一步落实地质状况,初步估算油气的地质储量,为下一步勘探工作指出有利的含油构造和勘探方向。

该阶段采用的主要研究方法有:① 地质法,如进行野外地质调查、油气地质专题技术研究;② 地球物理法,如在整个盆地范围内进行遥感探测、重力探测、磁力探测、地震勘探等工作;③ 地球化学法,如采用气测法、沥青法、水化学法、细菌法等判断是否具有油气显示;④ 钻井法,通过钻地质调查并取得资料后,直接进行分析研究。

## 二、工业勘探(详探)阶段

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,主要包括构造预探和油田详探两个阶段。

构造预探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。它的主要任务是发现油气田,判断是否具有工业价值,并初步圈定出含油边界。油田详探是在构造预探提供的有利区域上,加密钻探,并加大地震测网密度。它的主要任务是获取较多的地下信息,查明油气藏的特征及含油气边界,圈定含油气面积,提高储量探明程度,并为油藏工程设计提供基础资料,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,以及油层压力系统、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,将勘探工作和开发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、有步骤地开展系列工作,主要包括地震细测、钻详探资料井、进行油井的试油和试采、开辟生产试验区等四项工作。

### 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,加大地震测网密度,进一步落实地下情况。如江汉的王场油田,预探阶段地震测网密度为 1 km,详探阶段地震测网密度加密到 500 m。通过对地震细测资料进行解释,落实构造形态和其中的断裂情况,从而为确定含油带圈闭面积、闭合高度等提供依据。

### 2. 钻详探资料井

在地震细测确定的含油范围上,进行详探资料井的钻井,取得岩心资料,直接认识地层性质,该项工作是详探阶段最重要和最关键的工作之一。详探资料井承担了直接认识油层属性的任务,同时还要兼顾探边、探测断层分布的目的,此外这些详探井还可能作为以后的生产井,故要考虑以后与正式开发井网的匹配。因此,对详探资料井数目的确定、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应做出严格规定,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,以井尽量少而又能准确认识和控制全

部油层为原则来确定。在简单构造上,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为 1~2 km<sup>2</sup>,甚至更小。

详探资料井要进行录井、取心、钻杆测试、测井解释等工作。在这些工作所取得资料的基础上,对地层进行详细对比,确定油层详细的分布范围和隔层的分布状况,为下一步的井网部署和层系划分提供资料。

### 3. 油井的试油和试采

对详探资料井进行的下一步工作是试油和试采。试油和试采的主要目的是确定地层、流体、驱动能量、生产能力等参数,为指定开发方案提供第一手资料。

试油是指在油井完井后,把油、气、水从地层中诱采到地面上来并经过专门测试取得各种资料的工作。试油主要确定的资料有:① 油、气、水产量数据;② 油层静压、流动压力、压力恢复数据、井口的油管及套管压力数据;③ 油、气、水基本物性资料;④ 地层温度数据。

通过油井试采可以确定地下开采动态资料,从而确定开发方案中的部分技术界限和技术指标。试采井的选择要有代表性,平面上既要考虑到构造高部位、油层性质好的高产井,又要考虑到边部物性差的低产井,同时还要考虑到油水、油气边界及断层附近的井;纵向上要考虑在不同含油层系进行试采。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:通过试采,暴露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以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;
- (5) 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。

### 4. 开辟生产试验区

经过前期的地质细测、详探资料井和试油试采工作后,基本上可获取较详细的地质情况和基本的生产动态特征。为了全面认识在投入开发以后的动态特征,还需要进行生产试验区的工作,其目的是提前介入,提前开发,提前发现开发中存在的问题,并在油田开发过程中采取适宜的应对措施。

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,首先划出一块面积作为生产试验区,用正规井网正式开发,开展各种生产试验。大油田开辟生产试验区,中、小油田开辟生产试验井组,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,因此生产试验区的选择需要遵从一定的原则。首先,要求试验区所处的位置和范围对整个油田而言具有代表性,以使通过试验区获取的认识和规律对全油田具有指导意义。其次,试验区还要有一定的独立性和一定的规模,应该将试验区开发对全油田开发的影响降到最低,将相邻区块开发对试验区的影响降到最低;试验区的规模以能准确反映油田开发特征为宜。

开辟生产试验区主要是为全油田的科学合理开发提供指导,因此试验区在选取和将来的开发上要吸取国内外同类油藏的经验教训,同时也要针对本油田的性质,抓住本油田开发的关键问题。

#### 1) 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:

(1) 研究油层的地质情况,搞清各小层面积、分布形态、厚度、储量及非均质情况,搞清隔层的性质和分布规律。

(2) 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。

(3) 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 and 生产特点确定该油田的一些特殊任务。例如,对于有天然能量的油田来说,必须研究确定转注时间及合理注采比,而其他情况(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。

#### 2) 开辟生产试验区试验项目的研究

开辟生产试验区试验项目的研究,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。

(1) 油田各种天然能量试验。这些天然能量包括弹性能量、溶解气的能量、边水和底水的能量。应认识它们对油田产能大小的影响,对稳产的影响,以及各种能量和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) 提高采收率方法试验。包括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。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,分析它们对增加产量、提高储量动用程度、改善开发效果的作用。

(5) 与油田注水有关的试验。包括注水的时机、注采比的大小、合理的注采井距和合理的注采参数等。

总之,各种开发试验都应针对油田的实际情况提出,在详探、开发方案制订和实施阶段集中力量进行,而在油田开发的整个过程中,同样必须坚持进行开发试验,且坚持使试验走在前面,以所取得的经验指导全油田的开发。

### 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的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,一般很难掌握储层的非均质特点。为了解决这个问题,可以采用部署基础井网的方法。

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，可暂不射孔，及时进行油层对比，摸清地质情况，掌握其他油层的特点，必要时可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，合理的勘探开发程序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程序可以使人们对油田的认识逐步提高，同时又可以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不再适用，必须进行滚动勘探开发。

#### 四、油田开发理论与方法的发展历程与特点

一个油田在经过区域勘探、工业勘探阶段后，进入正式开发阶段。油田开发是一个长期的系统工程，从投入开发开始到油田开发结束，这一阶段统称为油田开发阶段。在这一阶段中，石油工作者要采用各种方法和技术对油田进行调整，使其按照开发方案的要求开发。所谓油田开发，就是依据详探和必要的生产开发试验资料，在综合研究的基础上对具有工业价值的油田，按照国家或市场对原油的需求，从油田的实际情况和生产规律出发，制定出合理的开发方案，并对油田进行建设和投产，使油田按预定的生产能力和经济效益长期生产，并在生产过程中做必要的调整，保持合理开发，直到开发结束。

油田开发是一门综合性技术科学，其研究对象是油藏，因此对油藏内流体性质、岩石性质、流体运移规律的研究都属于油田开发研究的范畴，也都属于油藏工程的研究内容。油层物理、油气层渗流力学、试井解释、数值模拟、油藏动态分析与调整、油藏经营管理等是油藏工程研究的主要内容。因此，油藏工程或者说油田开发是一门以认识油藏、改造油藏、开发油藏为目的的综合性技术科学。

##### 1. 油田开发理论与方法的发展历史

油田开发研究的历史基本与石油工程发展的历史同步。在不同的发展阶段，由于技术发展状况不同，对油藏的认识程度不同，油田开发研究的内容也不同，经历了一个从简单到复杂，从片面到全面的过程。综观整个油田开发的历史，可以大致分为以下五个发展阶段。

##### 1) 第一阶段(1859—1930年)

石油的开发在公元前已有记载，公元前5世纪，波斯帝国开始挖掘油井；公元前1世纪，中国的陕西、四川开始有气井出现。石油工业的起点应该从1859年算起，在宾夕法尼亚州开钻了第一口井——Edwin Drake井，井深21.2 m。在1859—1930年间，虽然石油产量在逐渐增加，但石油开发技术还处于初始阶段。在该阶段，油田开采对地下认识不全面，还没有把地下油藏看成一个统一的整体，认识上具有很大的片面性。油田的开发是以单独的油井为一个单元，采用的是密井网的做法，单井产量低，以衰竭开采方式为主。

## 2) 第二阶段(1930—1940年)

真正的油田开发是从20世纪30年代开始的,此时随着技术的逐渐进步,人们对油藏的认识逐渐加深。部分石油工作者已经认识到地下油藏的特征,将油藏作为一个统一的整体进行开发。例如,在1933年苏联召开的第一次石油会议上,著名学者古勃金批评了当时分割孤立开发油田的做法,强调了“研究和分析油田开采过程”工作的重要意义。与此同时,著名学者M·马斯凯特也提出了同样的观点。众多学者进行了大量的研究分析工作,提出许多经典的油田开发理论。例如,人们发现在地下油藏中存在各种各样的驱油能量,从而创立了油藏驱动能量学说;1935年R·J·薛尔绍斯在油层流体高压物性试验数据的基础上,分析了流体体积与温度、压力的关系,溶解气的溶解与分离过程等现象,首次提出了物质平衡方程。经过多名学者的完善和改进,物质平衡方程成为目前认识计算并分析油藏动态的有力工具。此外,达西定律也开始应用于油藏流体渗流规律的研究中,形成了地下流体力学。

## 3) 第三阶段(1940—1950年)

随着技术的发展,多种研究方法逐渐应用到油田开发研究中,取得的资料越来越多,对油藏形成的认识越来越深入,形成了油田开发的重要理论方法。例如,苏联学者A·П·克雷洛夫在大量研究的基础上出版了《油田开发科学原理》,该书综合应用油矿地质学、地下流体力学和经济学的理论方法来解决油田开发问题,建立了较为系统的油田开发理论;马斯凯特出版了《采油物理原理》;在矿场上,苏联和美国都进行了注水开发油田试验,取得了良好的效果;同时贝克莱水驱油的基本理论取得了重要成果,形成了油水两相水驱油理论,分析了井间干扰理论,建立了不同布井条件下的产量公式,有效指导了油田合理开发。

## 4) 第四阶段(1950—1970年)

1950年以后,油田开发理论和方法进入了快速发展的现代化发展阶段。在该阶段,随着各种新技术的应用,水驱开发油田的理论更加成熟,现代科学技术的应用和管理概念逐渐深入油田开发中。1956年苏联的罗马什金大油田开始采用内部切割注水开发,其他国家也开始大量采用人工注水开发油田。1953年美国学者G. H. Bruce等发表了《孔隙介质中不稳定气体渗流的计算》,提出了数值模拟的概念,经过多人的改进和提高,同时伴随计算机技术的发展,在20世纪60年代形成了三维三相的黑油模型。黑油模型可以用来解决注水开发过程中的数值模拟研究。在提高采收率方面,对热力采油和化学驱油进行了大量的研究,取得了重要的认识和成果。在油田开发理念上,提出从油田地质、油田开发、开采工艺等方面对一个油藏进行系统的研究,并进行开采现状分析,提出相应的问题和解决对策,采取有效的措施,提高油田开发效益,这即为油藏经营管理的基本概念。

## 5) 第五阶段阶段(1980—目前)

进入20世纪80年代后,各种高新技术大量应用到油田开发过程中,形成了大量新的开发技术与方法,其中主要以信息技术和水平井技术为代表。钻井技术的进步,尤其是定向井、丛式井和分支井技术的应用,使得油田开发能更好地控制地下储量,以较少的投入获取最大的开发利益,同时为部分特殊油藏和边际油田的开发提供了机会。此外,该阶段还有一个特点,即油田开发日益与多种学科相结合,发展了多种新的开采方法,形成了多个研究热点,出现了新的提高采收率方法,有效地提高了油田的开发效果。

在我国,随着目前陆上多数油田逐渐进入高含水开发期,开发难度越来越大,各种高新技术将会越来越多地应用到油田开发中,因此油田开发研究的领域和研究内容将越来越广。

## 2. 油田开发的特点

油田开发是在充分认识油藏特征的基础上,在一定原则的指导下,以先进的科学技术为手段,采出地下石油及其伴生物的科学实现过程。由于油藏深埋于地下,难以直接观察,其开发过程非常复杂,而且石油资源是一次性不可再生资源,因此油田开发与其他一般的工程技术相比有着显著的特点。

### 1) 不可重复性和持久性

石油开发过程是不可重复的过程,具有循序渐进性和持久性的特点。石油资源是一次性不可再生能源,同样油田的开发过程也是不可重复的,因此需要在仔细研究的基础上,认真做好开发方案,使油田的开发效果达到最优。一旦在油田开发过程中执行了错误的操作,地下油水分布不可能恢复到原来的状态,将会造成开发效果的降低。由于油藏深埋于地下,处于高温高压环境中,对之进行直接的观察和研究不具有现实性,因此目前研究油藏的方法技术都是间接的;而地下地质特征和流体分布是非常复杂的,这造成了石油工作者对地下认识的困难,对地下的认识是渐进的。随着油田开发的进行,获取的油藏资料逐渐增加,对地下的认识逐渐清晰,该过程是一个循序渐进的过程,不可能一蹴而就,因此需要经历长期由粗到细、由浅入深、由表及里的认识过程。

由于地下的复杂性和目前开发手段的局限性,油田开发是一个长时间的过程,一个典型油田往往要经历几十年的开发过程。在这个过程中,石油工作者应根据积累的资料和经验,逐步地全面认识油藏,提高油藏的开发效果。

### 2) 时变性和实践性

油田开发是以客观现实为基础,充分发挥主观能动性的科学实践过程。地下油藏是客观存在的,不随人的意志而转移。地下的特殊地质情况也是客观存在的,并且有可能随开发过程而发生变化。油田开发过程中应用的各种技术是逐渐发展的,是在实际应用过程中逐步完善起来的。油田开发还与所处的社会、经济、政治环境有很大的关系,在不同的环境下,油田的开发策略可能不同。这些客观存在的事实都是影响油田开发的主要因素,因此需要石油工作者在充分认识客观情况的基础上,发挥主观能动性,以充分开发油田。主要体现为:掌握先进知识,运用先进知识认识油藏,在现有基础上利用各种手段充分改造油藏。

### 3) 具有明确的目标

油田开发具有目标性,需要在一定的开发指导方针下进行。石油资源是现代工业的“血液”,是一种自然资源,也是一种政治资源,而油田开发是一个国家对地下资源使用的过程。因此,油田开发要达到一定的目标,遵从一定的开发方针。油田开发主要需要考虑以下问题:① 应首先满足社会对原油的需求。开采石油的最终目的是满足社会对原油的需求,因此在制定开发策略时,往往首先考虑的是国家、社会对产量的需求。② 石油资源是不可再生的,因此在开发过程中要最大限度地采出地下资源,尽可能地减少浪费。③ 油田开发是一个资金密集、技术密集、人才密集型工程,需要提高经济效益。整个油田开发过程涉及地质、物探、钻井、采油、油藏、储运、水电、土建、经济、管理等各个部门和各个行业,需动用大量的人力、物力和财力。例如,一口3 000 m深的油井的钻井费用可能达到数百万元,而一座海上平台的费用可能要达到上亿元。开发上任何轻率的决定都会造成经济上的巨大损失,因此在满足社会需求的前提下,应以提高经济效益为目标。

#### 4) 科学技术是第一生产力

油田开发涉及的技术多种多样,先进技术的应用可以带来巨大的经济效益。这就要求在整个油田开发过程中,决策者始终要注意采用先进的科学技术,真正落实“科学技术是第一生产力”的开发理念。不论是在硬件上还是软件上,都要在技术进步方面进行不断的努力,争取把先进的技术应用到生产实践中,提高油田开发的经济效益。

## 第二节 油(气)藏评价

一个油(气)藏在被勘探出以后,仅仅依靠初期的物探资料是难以准确描述其属性的,而油(气)藏开发又需要在深入掌握油(气)藏属性的基础上进行,因此在发现油(气)藏后,往往需要依据一定的资料对油(气)藏进行评价,为油(气)藏开发方案设计和编制提供科学依据。

### 一、油(气)藏评价的概念

所谓油(气)藏评价,是指通过地震细测、地质综合分析、钻探评价井、录井、测井、试油和试采测试、取心、分析化验、开辟生产试验区等获取油(气)藏各方面的信息,在此基础上进行多学科综合研究,形成对油(气)藏的更加全面的认识,并建立一个科学的油(气)藏地质模型。利用该模型可以对开发方案中的技术经济指标进行对比、优化和筛选。

### 二、油(气)藏评价的主要内容

储层和流体是构成油(气)藏的两个基本要素,因此在油(气)藏评价中需要对储层特征和流体特征进行详细的描述和评价,同时也需要对油(气)藏的渗流特征进行研究。油(气)藏评价主要包括以下几个方面的内容。

#### 1. 构造特征评价

构造特征评价主要包括构造形态研究、圈闭分析和断层系统研究三个方面,其研究成果主要是形成反映构造特征的顶、底面构造图和必要的不同方向的剖面图。在构造形态研究中,需要确定油(气)藏圈闭类型、长短轴及其比值、构造走向、构造顶面平缓度等;在圈闭分析中,主要确定圈闭的溢出口、闭合面积、闭合高(幅)度等参数;在断层系统研究中,主要确定断层走向、倾向及倾角、延伸范围、断距及断开层位、断层类型及其密封特性等。

#### 2. 油层特征评价

油层特征评价主要是采用测井资料对油层的平面分布延展规律和纵向油层分布进行分析,主要的成果为小层平面图、综合柱状图和必要的剖面图。由于岩石沉积过程和成岩过程复杂,导致含油层系分布也十分复杂,尤其是河流相沉积的油藏更是如此。目前一般按照储层的沉积旋回和韵律及油层之间的连通性将油层划分为小层、砂岩组、油层组和含油层系,然后逐一描述它们的形态、厚度、分布和连通关系等。油层之间由隔层分开,隔层与油层相伴而生。通过测井资料和其他资料可以确定隔层厚度、延伸范围、隔层岩性、隔层类型、隔层物性和隔层分布频率以及隔层在油(气)藏中所起的作用等。

#### 3. 储集层特征评价

油(气)藏是形成于储集层中的,储集层性质直接影响岩石储集油气的能力和流体在其



中的渗流能力。通过储集层特征评价,主要确定岩石性质、物性特征和非均质状况。具体包括:岩石矿物组成、粒度组成及分选程度、胶结物、胶结类型及胶结程度、磨圆度及成熟度、黏土矿物含量;孔隙类型、孔隙结构、孔隙度及渗透率分布、渗透率变异系数等。在研究以上参数的基础上,还需要对储集层进行分类。

#### 4. 油(气)藏流体特征评价

油(气)藏含有油、气和水等流体,它们的富集状态、物理性质和分布规律对油气开采有很大的影响,弄清油水关系是做好开发工作的前提条件。

##### 1) 确定油水关系

油(气)藏流体包括油、气、水,它们在油(气)藏中按密度的大小呈规律性分布,描述油、气、水分布的主要参数有以下几个。

(1) 含油边缘: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,称为气顶边缘。

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

(3) 油水过渡带: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。

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

(6) 含油(气)高度:油(气)、水接触面与油(气)藏最高点的海拔高差。

利用以上参数即可表述油藏中的油水分布规律。图 1-2-1 是一个背斜油气藏中的油、气、水分布示意图。

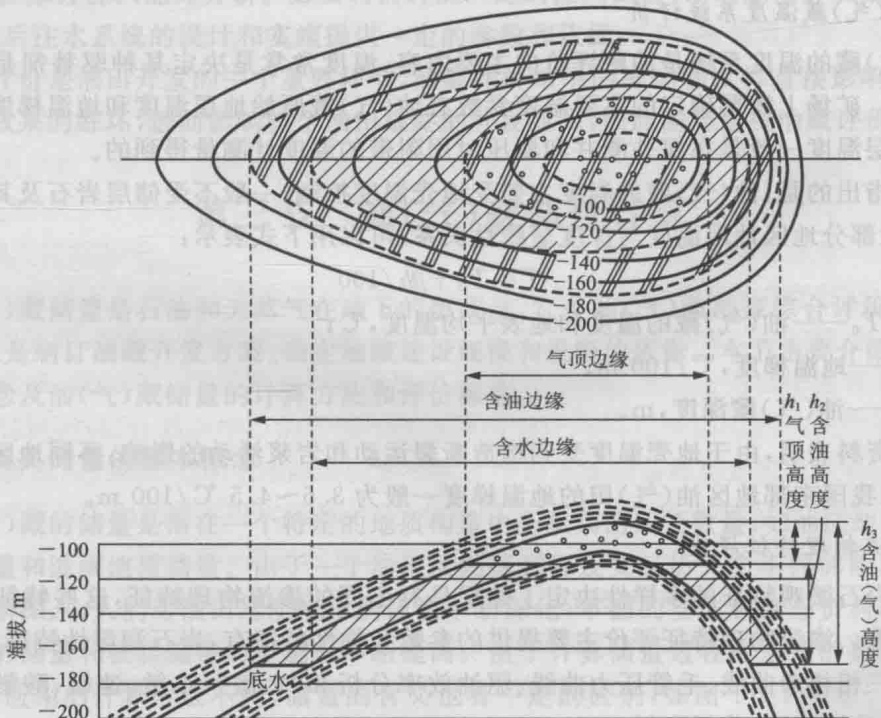


图 1-2-1 背斜油气藏中油、气、水分布示意图