

油田开发指标 计算方法

蔡尔范 编著



石油大学出版社

油田开发指标计算方法

蔡尔范编著

业学院图书馆
书章

石油大学出版社

鲁新登字 10 号

内容简介

叙述了油田开发和开发工艺的基本概念及油田开发中应注意问题；论述了用水动力学方法及利用过去开发生产资料对油层产量进行预测的方法；对不同地质条件和开发工艺本书整理了一百廿多种油田开发指标计算方法，有一章专门论述对非均质油层的开发指标计算方法。研究了在不同开发阶段采用注入溶剂、蒸汽、热液和层内燃烧等提高采收率新方法的计算方法。书中有图幅 261 幅，108 个表，列举了 103 个例子，有自我检查题 111 题，习题 138 题。

可供从事于油田开发的工程技术人员阅读，也可作为有关院校师生及科学研究人员的参考书。

油田开发指标计算方法

蔡尔范编著

*

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

全国新华书店发行

江汉石油学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 29 690 千字

1993 年 1 月第 1 版 1993 年 1 月第 1 次印刷

印数 1-2000

ISBN 7-5636-0282-8 / TE·61

定价: 20 元

目 录

绪论	(1)
第一章 油田开发和开采的生产过程、开发系统	(4)
第一节 油田参数总特征	(4)
第二节 油气藏驱动类型	(6)
第三节 原油采收率	(9)
第四节 油田开发和开采生产过程的结构纲要	(11)
第五节 多层油田开发系统、生产层系划分	(13)
第六节 根据布井情况对开发系统分类	(15)
第七节 根据所利用能量开发系统分类及其特征	(18)
第八节 确定基础井的水动力学计算	(25)
第九节 考虑开发单元投产顺序的采油量计算	(31)
第十节 油田开发阶段	(35)
第十一节 油田开发设计文件	(37)
自我检查题	(42)
习 题	(43)
第二章 水动力学型油田开发数学模型	(47)
第一节 油层模型类型	(48)
第二节 根据地质地球物理和油矿资料建立油层模型的方法原理	(51)
第三节 油层平面非均质和分层模型的概率统计描述	(53)
第四节 具有拟相对渗透率曲线的均质油层模型	(67)
第五节 开发过程模型	(70)
第六节 岩石、地下液体和气体性质	(77)
第七节 开发计算中数学方法的应用	(84)
自我检查题	(98)
习 题	(98)
第三章 利用过去阶段开发资料作油田开发预测	(100)
第一节 物质平衡法	(101)
第二节 基于对一些油田实际资料分析所得规律来预测相似油田开发指标	(115)
第三节 根据过去开发统计资料确定期望产油量	(121)
第四节 预测水驱油田开发指标的矿场统计法	(136)
自我检查题	(143)
习 题	(143)
第四章 天然能量开采油田开发指标计算	(146)

第一节	弹性驱动特征	(146)
第二节	弹性驱动下有油层边外区油田边界压力变化预测	(151)
第三节	无穷大地层中圆形油藏定压生产	(165)
第四节	渗流的弹塑性驱动	(167)
第五节	溶解气驱开发油藏期望采油量的确定	(170)
第六节	溶解气驱为主的混合驱动和气压驱动下的油田开发指标	(176)
	自我检查题	(190)
	习 题	(190)
第五章	注水油田开发指标计算	(194)
第一节	主要开发指标	(194)
第二节	在活塞式水驱油模型基础上层状油层开发指标计算	(197)
第三节	在非活塞式水驱油模型基础上均质小层开发指标计算	(210)
第四节	裂缝孔隙型油层的水驱油开发计算	(230)
第五节	注水开发油田工艺指标计算方法	(234)
第六节	注水量与注水井井数计算	(241)
第七节	地层压力与油井产量计算	(243)
第八节	确定极限产量或极限压差的原则	(249)
第九节	注水开发油田的一些有关问题	(250)
	自我检查题	(253)
	习 题	(254)
第六章	产层非均质性的开发指标水动力学计算	(262)
第一节	Борисов 法	(262)
第二节	Саттаров 法	(265)
第三节	Ковалев, Сургучев 和 Сазонов 法	(266)
第四节	Лысенко 和 Мухарский 法	(271)
第五节	Пирведян 法	(274)
第六节	大庆概算法II	(277)
第七节	ВНИИ-2 法	(285)
第八节	开发指标计算方法的选择	(287)
	自我检查题	(288)
	习 题	(289)
第七章	油气田、凝析气田和异常性质油层的开发计算	(290)
第一节	天然驱动开发	(290)
第二节	采用对地层作用方法的油气田开发	(304)
第三节	计算油气田开发指标的经验法	(313)

第四节	深层异常高压油层	(321)
第五节	非牛顿原油油藏开发特征	(324)
第六节	油气田和异常性质油层的开发主要结果和问题	(327)
自我检查题		(328)
习 题		(328)

第八章	物理方法油田开发指标计算	(331)
第一节	油层温度及其在开发过程中的变化	(331)
第二节	热水和蒸汽驱油	(336)
第三节	用热段塞方法向油层注入载热体时的油田开发	(346)
第四节	层内燃烧的驱油机理与工艺	(348)
第五节	干、湿层内燃烧	(356)
第六节	对湿燃烧驱油过程的近似算法	(358)
第七节	注水提高采收率的水动力学方法	(370)
第八节	物理方法开采油田的开发结果和问题	(372)
自我检查题		(373)
习 题		(373)

第九章	提高采收率的化学方法	(379)
第一节	高压下注入溶剂和气体驱油	(379)
第二节	注二氧化碳油田开发	(385)
第三节	表面活性剂水溶液驱油	(389)
第四节	溶剂驱油开发指标计算方法	(397)
第五节	注聚合物驱和微乳液-聚合物驱	(413)
第六节	提高采收率化学方法的应用问题	(421)
自我检查题		(422)
习 题		(422)

第十章	油田开发经济指标和规划	(426)
第一节	油田开发经济指标	(426)
第二节	采用提高采收率方法油田的开发经济指标	(432)
第三节	勘探开发系统的数学模型	(436)
自我检查题		(451)
习 题		(451)

参考文献		(454)
------	-------	-------

附录: 一、概率积分	(456)
二、幂积分函数	(457)
三、计算题录	(458)

绪 论

经科学论证由地下采出烃类的实施过程称之为油田开发。目前可以很有根据地认为,油田开发理论作为具有自己研究对象,自己的目标函数和自己的求解方法的独立科学已基本形成。

本世纪初油田是靠天然驱动用无控制开发方式进行生产的。那时,虽然对很多石油问题进行了研究,但并未形成采油的科学基础。早在 1856 年法国工程师达西就发现了基本渗流规律;并且正如后来所表明的那样,原油稳定和不稳定渗流方程类似于早在十九世纪初就已发现的拉普拉斯和富利叶数理方程,但是直至本世纪三十年代这些方程才开始用于油田开发。这时已经发达的渗流理论数学方法在石油工业中还未找到应用。三、四十年代美国学者 M.Muskat 和 M.C.Leverett 提出了非活塞式驱油的前缘驱油理论。当时的另一成就是建立了油田驱动类型学说。

四十年代末在 А.П.Крылов 等人著作《油田开发的科学原理》中首次将油田开发基本原理公式化、系统化,将油田开发发展成为一门综合性的学科;解决了一系列重要的地下水动力学问题。应指出,油田开发理论一出现就具有两个基本特点:一是多学科横向的综合联接;另一是明显的理论倾向,与地学、物理学、经济学有着密切的亲缘关系。

五十年代在油田开发领域里的研究发展很快。混合驱动(水压和溶解气驱)油田开发问题的解决曾得到了很大的发展。除了面积注水和边外注水以外,出现了内部切割注水、屏障注水、点状注水、间歇注水等注水方法。用水动力学试井资料确定油层参数的方法开始得到迅速发展。用概率统计模型对油田开发计算建立了方法基础。在油层中渗流时直接考虑非均质性的方法也得到了发展。五十年代后期还产生和发展了油藏新模型(裂缝和裂缝-孔隙型双重介质)。六十年代油田开发分析和调整方法及开发系统本身也得到了实质性发展。

油田开发设计、分析调整的发展要求应用更为复杂的数学方法和计算手段。三十至五十年代在计算中主要是用地下水动力学解题的精确和近似方法,而从六十年代开始,除了继续研究精确解和近似解以外,应用渗流问题的数值求解方法,形成了油藏数值模拟方法。

最近三十年内由于各国加强了对提高采收率各种物理化学作用的研究,特别是对开发高粘度原油用热力开采方法的研究。油田复杂开发过程的计算,不仅要求考虑地层中流动的多样性,而且还应考虑其多组分性、相态变化、地层中渗流物理性质的变化等,从而形成了多相多组分渗流理论,并有人对物理场油田开发、统计渗流力学等作了理论探索。后者是用随机场概念来解释孔隙介质及其渗流过程,研究复杂的非均质渗流。

现代数学手段(优化理论、规划方法,图论、泛函,现代概率统计方法,数值解法等)的引入加速了油田开发学科的发展。

随着我国石油工业的发展,很多油藏逐渐进入复杂的开发中后期,不少油藏的综合含水已达 70-80%,对这些油藏剩余储量的开采需作很大的努力。客观上近年来新投入开发

的油藏和新发现的油藏, 矿场地质特征越来越差。其中稠油油藏, 地质结构复杂的油藏, 底水油藏, 以及深层具有复杂的热动力条件的油藏等所占的比例也增加了。因此, 石油工业的客观发展趋势要求从事油田开发的工程技术人员掌握各类油田的地质特征和开发特征, 并应学会对各类油田进行开发指标计算的原理和方法。华北等油区发现了大量裂缝—孔隙型双重介质油田就要求我们学会包括对双重介质油层的开发指标计算方法。随着喇嘛甸等油气田, 以及华北的底水油藏投入开发, 要求掌握在避免气锥(或水锥)突破情况下计算极限产量等方法。华北、中原等油区凝析油气田的发现, 就要求研究凝析油气田的开发特征及开发技术指标的计算方法。青海尕斯库勒异常高压油田的发现, 就要求我们研究这些深层油藏在开发过程中的岩石非弹性变形情况。

我国石油工业发展要求我们提高油田开发方法的效率和提高原油采收率。在这方面起着重要作用的是采油技术领域的科学技术进步, 和在提高原油采收率过程中充分利用新的科学研究成果。但如果没有在开发指标现代计算方法基础上的采油预测方面的知识和技能, 就不可能顺利完成上述任务。

在油田开发实践中, 在水动力学计算和利用过去开发资料的基础上, 开发指标预测方法得到了广泛地应用。根据水动力学计算结果可以得出在不同开发条件下, 产油量、井数随时间的变化曲线。目前已提出大量开发指标的水动力学计算方法, 这些方法只是在对产层结构特征方面, 以及渗流特征方面考虑程度不同。一些油区对预测资料的利用情况表明, 这些方法的通用性(特别是在油田开发初期), 有利于油田很快投入工业性开采。

含油产层的多种多样复杂性质(这取决于产层形成过程及以后的矿山地质过程), 油层中油、气、水渗流的物理化学过程及不断变化着的热动力学条件, 如果对这些因素都作全面考虑就难以建立开发指标精确计算方法。同时考虑很多因素将会使所建立的开发指标计算方法非常复杂, 例如 ВНИИ-2 法。它对具体问题的求解就需要用大储存量的高速电子计算机。由于计算太复杂, 在决策时往往就在经验和试算的基础上确定所计算的开发指标。因此, 建立在水动力计算基础上的开发预测方法都有某些假设。只有在对这些假设有深刻了解的基础上, 才有可能进行更深入研究。在本书中集中论述各种方法, 读者可对具体油田开发油矿地质条件选择合适的计算方法。

油田开发实践表明, 对于具有很复杂地质条件和地下原油不利性质的油田最好能采用不太复杂的计算方法, 然后根据过去的开发资料进行校正。

用水动力学方法及利用过去开发资料作开发预测时应注意所进行计算的正确性, 往往由于对油层中地下原油、气以及渗流的相互作用缺乏深刻理解而使计算出现误差。

由于现阶段油田开发要求采用提高采收率新方法, 油田开发预测就必须考虑研究提高采收率的主要方法(注溶液、蒸汽、层内燃烧等)。因此, 本书中有专门章节论述这些方法。应指出的是这些方法是建立在不太复杂模型基础上的, 并可作为更深入研究的起点。

油田开发作为一门学科是属于工程学科范畴的。它不仅应定性, 更主要应定量地研究油田及其开发过程, 并为工程决策作好准备, 以提出不是描述性的而是定量形式的设计。因此, 本书中要广泛应用数学方法, 甚至可以认为, 油田开发是一门数学方法应用很多的工程学科。这是由于开发工作者不可能直接接触自己的工作对象(油层), 甚至也不是通过直接测定, 而是在对地球物理和水动力学测试资料作数学处理的基础上来认识油田的。在油层开发期间所发生的过程, 开发工程师只能根据在井中的反映用所谓数学反问题求解的

方法结合起来叙述。

方程组可以用近似方法求解,也可用数值方法求解。用数值方法求解,对油层的参数要求很高,要求对油田有详尽而且确切的描述,而这一点在一般情况下难以做到。并且数值解法已有专门书籍论述。因此,本书以生产中简单实用的近似解法为主。

注水开发油田开发指标的计算方法,主要采用近似方法,其中有代表性的有等值渗流阻力法,水电相似模拟法,流管法,以及积分关系法。尤其是等值渗流阻力法及其改进形式研究比较深入,提出许多与精确解相差极小又便于矿场手算的计算公式,并与流管法相结合解决了井排注水井条件下见水前后开发指标计算问题,其中考虑到油水粘度差,非活塞式驱替,以及见水后渗流流线分布等较困难的题目。另一方面,直接用解析函数,尤其是双周期函数来研究复杂面积注水网开发取得很大进展。其理论基础是势函数。这个方向的研究不仅可以得到严格的解析解,直接用于开发指标计算,而且常被用来检验和评估数值方法对复杂面积注水计算的精确度,并且是油田开发中许多最优化问题的一部分。

美国砂岩油田注水开发指标计算方法因在 F.F.克雷格《油田注水开发工程方法》(石油化学工业出版社,1977年)一书中有全面地论述,本书就省略了这一部分。

为了使读者便于掌握这些基本概念和计算方法,提高对具体问题的计算能力,本书特别注意加强例题和习题部分,全书共举了 103 个算例;有 111 道自我检查题;并附有大量习题。习题可分为三类:一般习题 90;大习题(相当于大作业,在书中以 * 表示)27 题,教学科研题(在书中用 ** 号表示)21 题。教学科研题是为培养科研能力而设置的。本书可作油田开发生产、科研单位科技人员的参考书,为了便于查找油田开发的近似计算方法,书中附录三为计算题录(125 个)。

第一章 油田开发和开采的生产过程、 开发系统

油田开发和开采的生产过程是将原油从地下采出成为商品油所需的一切人们活动和生产工具作用的总和。

第一节 油田参数总特征

从将原油由地下采出的技术工艺和经济角度可将油田参数分为三组:矿场地质参数,经济地理参数和社会经济参数。

矿场地质参数。主要的有:1)油田几何形态(形状,面积,含油高度,个别油藏和产层的分层性,埋藏深度);2)储集层性质(属于容积特性的有:孔隙度,含油饱和度;属于渗流特性的有:渗透率;属于岩性特性的有:粒度组分,比面,碳酸盐含量;属于物性的有:机械性能,热物理性能等);3)流体的物理化学性质;4)油田能量特性;5)原油储量及其密度。

在开发时能采出原油的一层或若干相互连通储集层中天然局部的原油聚集地称为油藏。处于同一局部面积内,属于同一或若干天然圈闭的油藏组称为油田,油田可以是单层的,也可以是多层的。通常一个油田有若干油藏。产层厚度变化范围很大,由几米到几十米,有时甚至几百米,油田一般为长5-10km,宽2-3km,高(含油高度)50-70m。

一般可将油(气)藏分为:气藏、凝析气藏;具有不同溶解气含量的油藏(一般不少于200-250m³/t,有时也有更高的);不同原油、气或凝析气储量比的油气藏。

六、七十年代地质师们发现,取决于温度压力和热催化条件的,油(气)藏在沉积层中的沿深度(垂向)成带状分布。它们可相应地划分为:1)主要为纯气藏,也有油藏,但往往是重质油藏带(小于1350-1500m,有时达1900m);2)主要为轻质油,有时还有凝析油藏带(小于4000-4500m,有时达6000m);3)主要为凝析气藏,很少有很轻质油藏带(达5000-6000m,有时更深);4)干气(甲烷)藏(直至沉积层基底)。油藏的温压条件和原油性质特征见表1-1。

表1-1 地下原油特征(按 Г.Ф.Требин 等人)

参 数	折算的“平均”值	对 20%油藏	对 50%油藏
地层压力, MPa	15	12.5-16.2	9-21
地层温度, K	298	295-302	292-317
饱和压力, MPa	9.5	8.6-11	6-12.2
含气量, m ³ /m ³	35	20-40	10-55
溶解系数, m ³ /(m ³ .MPa)	5	4.2-5.7	3.3-6.7
地下原油密度, kg/m ³	850	800-860	750-890
地下原油粘度, mPa.s	2.2	1.7-3.2	1.2-4.8

具有储集层容积性能油田的大小和多层性就决定了其储量值和储量密度,如再考虑油层的埋藏深度就可以选择开发系统和采油方式。

储量多,而且集中在较小面积内多层油藏的采油特征是其高效率。近年来按油田可采储量值(Mt)可有条件地将它们分为:小油田(小于10Mt),中等油田(10—30Mt),大油田(30—300Mt)。大型和特大型油田在世界平衡表内储量中起着首要的作用。

随着埋藏深度的增加,油田的建设费用、钻井费用、生产费用也就增长,并使将原油从地下举升到地面的条件复杂化。目前世界上一般称深度由4500到7500m的井为深井,由7500到15000m的井为超深井。

储集层和流体性质就决定了开发系统、油井产量、原油开采的完全程度、采油过程等等。井筒中地层出砂、原油析蜡、矿场盐的沉积、流体的腐蚀性等对采油技术有实质性的影响。渗透率、油层厚度和原油粘度就决定了油井产量。按油井初始产量(t/d)一般可划分为低产(小于7),中产(7—25),高产(25—200)和超高产(大于200t/d)油藏。

经济地理参数和社会经济参数在解决新采油布局和发展问题时有着重要的意义。经济地理参数是指油田的区域位置,它包括油田距经济发展区多远;其气候、地形、土壤和植物特征;该区发生地震的可能性;地方建筑材料资源、水资源和电能资源;该区经济开发程度等。

经济开发程度是指该区的居住条件和经济关系(有否工矿企业,其他有用矿场储量,食品等),居民密度,人力资源(自由劳动力)情况,有否输送管道,能量供应系统等。工业发达地区的油田投入开发条件较好。由于石油工业是高投资行业,所以在那些地区的油田可以在较低投资情况下投入开发,因为不需要大量移民和进行高定额的生产设施建设。

地形,地震活动性,沼泽化程度或者干燥情况,气候条件,水的深度,油田的海拔高程等在选择开采工艺和组织工作时起着重要作用。例如,塔里木位于沙漠区;江苏石油勘探局有的小油田在湖泊区,在洪水季节则几乎完全淹没;青海一些油田地处高原区;俄罗斯西西伯利亚北部远景区约有一半面积为永久冻土带;西伯利亚中部和北部平均沼泽化程度大于50%,而个别地区达70—80%;独联体的中亚细亚、高加索、喀尔巴阡、克里米亚是属于地震活动区。这样的条件对人类活动,采油和输油有着实质性的影响。为了能在这样复杂条件下工作就必需有专门的技术和采油设备,以及油矿综合自动化等技术手段。

社会经济参数与社会的社会经济发展情况紧密相关,并基本上取决于国民经济计划,以及决策机构的决定。这些参数包括:油、气和其他伴生组分的质量;油田的国民经济和国防意义;开发期的社会历史特征(该区和全国的储采比);采油工艺和技术,油气加工和利用的科学技术进步;国家对建立新工业中心的政策;国际合作发展情况;以及劳力分配等。

原油的商品质量(原油的馏分和组分,含硫量,燃烧热能)可以决定工艺的选择和每年产油量,并能决定油田的国民经济和国防意义。储采比取决于允许的采油成本(极限成本,油井合理产量),邻近区远景发展计算,国家燃料能源结构的变化情况,油田开发和开采技术方面的科技进步,国内政治情况,以及世界石油市场情况。这些参数可以对具体油田开发设计以规定值的形式表示。

油田所有参数的这种组合,在社会主义社会中就决定了采油过程的国民经济效果,并可称为油田的工业价值。它还决定了每个新油田投入开发的顺序和时间,以保证总绝对量

的增长, 弥补老油田产量的自然递减。工业价值可以用油田参数极限值, 即以标准来表示其特征。标准是属于时间范畴的, 它们是随着石油工业发展的技术经济水平和对原油的需求而变化的。

因此, 油田参数决定了采油过程, 我们的任务是完善和提高这些过程的总技术经济效益, 并考虑具体的天然条件, 以及对周围环境和地下矿藏的无条件保护。

第二节 油(气)藏驱动类型

开发过程中呈现的地层能量主要类型称之为油(气)藏驱动类型。

地层能量来源和特征

能量, 这是确定物体作功能力的物理量。采油中的功可以表示为能量差或所释放的能量。这些能量对于原油在地层中流动, 并流到地面是必须的。我们可以区分为天然能量, 以及从外界由地面人工保持地层能量。它们可表示为作为位能和弹性变形能的潜能。

位潜能

$$E_{pos} = Mgh_{cT} \quad (1-1)$$

式中 M ——物体(地层水或注入水, 油, 游离气)质量; g ——重力加速度; h_{cT} ——(与任意选择的初始计算点处平面相比较的)物体举升高度(对液体为水力压头)。

由于体积质量 $M = V\rho$, 而 $\rho gh_{cT} = p$, 所以位能等于物体体积 V 与所形成压力 p 的乘积:

$$E_{pos} = V\rho gh_{cT} = Vp \quad (1-2)$$

式中 ρ ——物体密度。即物质质量和其位置高程(压头)或物体体积和其所形成的压力越太, 则其位潜能也就越大。

弹性变形的潜能

$$E_{def} = F\Delta l \quad (1-3)$$

式中 $F = pA$ ——等于压力 p 与面积 A 乘积的力; Δl ——线性(膨胀)变形。

由于体积膨胀增量为 $\Delta V = A\Delta l$, 所以

$$E_{def} = p\Delta V \quad (1-4)$$

在弹性变形时的体积增量 ΔV , 根据虎克定律, 可用介质弹性体积系数

$$B = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-5)$$

表示, 所以

$$E_{def} = BVp\Delta p \quad (1-6)$$

因此, 介质(水, 油, 气, 岩石)的体积 V 和弹性, 压力 p 和压力可能下降值 Δp 越大, 则其弹性变形的潜能越大。地层水和游离气的多少就分别决定了含水区和气顶的大小, 而油中溶解气量就决定了原油体积 V_o , 饱和压力 p_b , 或地下原油含气量 G_o (单位地层原油中所含的标准状况下所测定的溶解气量):

$$V_g = \alpha_p P_b V_o = G_o V_o \quad (1-7)$$

式中 α_p —气体在油中的溶解系数。

由此可以认为, 地层能量的主要来源为: 地层水(边水, 底水)压头能(位能); 游离气(气顶气)的膨胀能; 溶解气的膨胀能; 溶液(水、油)和岩石的弹性能; 原油压头能(位能)。

这些类型的能量在油藏中可以一起呈现, 并且油、水、岩石的弹性能总是能够观察到。在油气藏顶部, 气顶能量起着活跃作用, 而在边部地区则为地层水压头或弹性能量。根据采油速度的大小, 位于外含油边界附近的油井可能会形成屏障效应, 这时油藏中心部分主要是溶解气的膨胀, 而在边缘部分主要是地层水的压头或弹性等等。地层能量的消耗效果, 即其值每减少一个单位所能得到的原油量, 取决于能量的类型和初始量, 采油方式和速度。

在上述基础上可以认为地层能量的性质取决于压力, 液体(油、水)和岩石的弹性, 含气量, 与原油有关的水和气体体积。当注入井注入水、气、蒸汽和各种溶液时, 就向地层引入人工能量。

地层能量在原油的流动中消耗在克服各类阻力, 重力和毛管力, 并在压力下降过程中, 在储集层内形成压差 Δp (地层压力 p_r 和井底压力 p_{wf} 的差值) 时呈现。

油藏驱动类型

在采用对油层作用方法以前, 是用消耗天然能量来开发油藏的。这时就出现了油藏驱动类型的重要概念, 它是以推动原油在油层中流动力的特征来分类的。

根据能量的主要类型可将驱动类型划分为: 弹性驱; 弹性水压驱; 水压驱; 溶解气驱; 气压或气顶驱; 重力驱, 以及混合驱。《纯粹型式》驱动类型的这样划分是有条件的。当具体油田开采时基本上能发现是混合驱的。

弹性驱动的条件是地层压力, 即地层所有点处的压力高于饱和压力 p_b 。这时井底压力 p_{wf} 不能低于 p_b , 原油处于单相状态。在开采井中所形成的压力(压差)扰动随时间将传播到油层深部(弹性驱动的初始阶段)。在井的周围形成逐渐增大的压差漏斗。原油靠液体(油和束缚水)和岩石弹性能量和弹性膨胀能量流动。当压力降低时原油和束缚水体积增大, 孔隙体积缩小; 这样就有相当原油体积流入井中。然后个别井的压降漏斗扩大、合并, 形成总的压降漏斗, 随着采油, 总压降漏斗传播到油藏边界。

如果油藏是岩性或构造封闭的, 则将进入弹性驱动的第二阶段。在第二阶段期间, 与含油边界相重合的地层封闭边界处压力随时间下降; 油藏压力也下降。当油藏明显欠饱和时, 弹性驱动可以延续很长时间, 否则弹性驱将很快转为其它驱动类型。在整个地层体积中原油弹性储量通常仅为很少部分(为原油总储量的 5—10%)。当油藏边界封闭时第二阶段将呈现出弹性驱的亚种——封闭弹性驱动。

如果油藏不封闭, 则总压降漏斗将传播到边外水域中, 该水域按大小往往要比油藏大得多, 并与油藏连通。这时弹性驱将转为第二亚种——弹性水压驱动。弹性水压驱动呈现出原油、束缚水、水域水, 以及油藏和水域岩石的弹性膨胀能量和水域边水压头能量。在这种驱动方式下, 产液量不能完全被侵入油藏的水所补偿。在压力下降区岩石和地层水膨胀是将水推向油藏和侵入油藏的能量来源。水和岩石的压缩系数是不大的, 但当压降区很大, 为油藏的几百倍时, 地层弹性力就成为大量能量的来源。

当地层压力下降 Δp^* 时, 由于弹性力由油藏可采出原油体积 ΔV 为

$$\Delta V = \Delta V'_o + \Delta V_o = V_o \Delta p^* C_o^* + V_w \Delta p^* C_w^* \quad (1-8)$$

式中 $\Delta V'_o$, ΔV_o —分别为由于油藏本身弹性和由于含水区弹性所能采出的原油体积;
 V_o , V_w —分别为地层含油和含水部分体积; C_o^* , C_w^* —分别为含油部分和含水部分的地层体积弹性系数($C^* = \Phi C_l + C_r$, 其中 Φ —平均孔隙度; C_l , C_r —分别为液体和岩石的体积弹性系数)。

对于封闭弹性和弹性水压驱动, 在定产开采(或在定压 P_{wf} 情下降低产油量)的初始阶段压力明显下降。在弹性水压驱动下开采, 压力(产量)的进一步下降速度减缓。这是由于扰动波及到随时间逐渐增大的水域, 并且为了保证达到同一采油量所需的压力下降值将小些。如果含水区的外边界处于位置比井底的高, 则除了弹性能量以外, 还作用着边水的压头(位)潜能。

从压降漏斗的传播超出油水界面, 进入边外水域时开始, 水侵入油区, 并将原油驱到开采井井底。在地层热动力条件下, 当油藏产液量与侵入油层的边水或底水达到平衡时就呈现水压驱动, 这种驱动类型还被称为刚性水压驱动, 因为产液(油、水)量与侵入水量达到平衡。这种驱动类型是与供给边缘存在和为满足上述条件向地层注入必须水量有关。在天然条件下纯粹的水压驱动是没有的, 但将它划分开来将有助于顺利和可靠地设计采油过程。产液量与水侵量之间的平衡不能保持, 就会使其他类型的能量起作用: 当水侵量增大时呈现弹性能; 当水侵量减少(产液量增加)时呈现弹性水压驱动; 当地层压力降到低于饱和压力时呈现溶解气能量。当水压驱动时, 地层中原油处于单相状态。

在地层压力低于饱和压力情况下呈现溶解气的膨胀能, 就形成溶解气驱。当地层压力低于饱和压力 p_b 时, 原先溶解于原油的气体开始析出。析出的气泡膨胀, 并带动原油流到井底。部分气泡分离出来, 并堆积在构造的穹窿形成次生气顶。含有完全被气体饱和原油的油层(原始压力 $p_r = p_b$)有可能呈现纯粹的溶解气驱。这种驱动类型可分成两个阶段。在第一阶段期间每口井的压降漏斗逐渐扩大到与其它井的漏斗合并或到油层的天然边界(含油边界)。在第二阶段期间油藏压力, 压降漏斗交结线或油层边界处压力都下降。其特征是地层压力(产油量)的高速下降和气油比(标准状况下产出气量与脱气原油产量的比值)不断变化: 开始增长到极大值, 然后减少。如果油藏原始地层压力 p_r 高于饱和压力 p_b , 则在初期当地层压力下降至饱和压力以前, 油藏是靠消耗弹性能量或消耗弹性能量和水压头开采的。如果 $P_{wf} < p_b$, 则气体膨胀能量与上述能量一起呈现。

主要是由于呈现气顶受压缩游离气的膨胀能, 而形成气压(气顶)驱动。气顶是指油藏之上游离气体的堆积处。这种矿藏就被称为油气藏(或凝析油藏)。根据气顶的压力状况可以划分出两种气压驱动: 弹性和刚性。

在弹性气压驱动下由于产油, 气油界面处地层压力的某些下降, 就会造成气顶游离气体体积的膨胀, 并且驱动原油。随着油藏原油的产出, 气体压力下降。

刚性气压驱动不同于弹性气压驱动, 在采油过程中气顶压力不变。纯粹的刚性气压驱动只是在向气顶不断注入足够气量, 或者当气体储量比原油储量大得多时才可能呈现。这时随着原油采出, 气顶压力下降非常缓慢。

呈现气压驱动的条件是油气界面处的原始地层压力 p_r 等于饱和压力 p_b 。因此当形成压差时, 溶解气析出, 并膨胀驱动原油。部分气体分离到高部位, 并补充气顶。这样就会

延缓地层压力下降速度，并使远离油气界面的井，气油比较低。靠近油气界面的井由于气窜，气油比一般很高。

当只有原油压头(重力)潜在能量起作用，而其它能量已经枯竭时才呈现重力驱动，在原油本身重量作用下将原油堆到井底。

同时呈现溶解气能，弹性能，水压头能的驱动类型被称为混合驱动。它常常被看作为当 p_{wf} 低于 P_b 时水驱混气原油。含油边界处的压力等于或曾经高于 p_b 。这种驱动类型可划分为若干阶段：最初呈现的是原油和岩石的弹性能，然后加入溶解气的膨胀能，最后水域压头和弹性能量。水压驱动和气顶驱动的组合(气、水压驱动)也属于这种复杂驱动。有时在具有水压区的油(气)藏中能观察到这种驱动类型。这种驱油类型的特征是液体的双向流动：油水和油气界面同时侵入油藏，可以有条件地将油藏分为气压驱动开发区和水压驱动开发区。

驱动类型的归纳和实现

对驱动类型还可以给以补充特征，可划分出含油边界移动的驱动类型和含油边界不移动的驱动类型。属于前者的是水压驱动，气压驱动和混合驱动；属于后者的有弹性驱动，溶解气驱等。水压、气压和混合驱动又被称为驱替驱动(压头驱动)，而其余的则被称为枯竭驱动(地层能枯竭)。

是从天然呈现(天然驱动)角度来研究上述驱动类型的。矿藏天然条件只有利于形成某种一定的驱动类型。具体驱动类型可以确定，并可以用改变开采速度和累积产液量等方法，以及向油藏注入补充能量来保持或改变驱动类型。例如，水侵量低于产液量，则油层压力就会进一步下降。当引入补充能量时，所形成的驱动类型被称为人工(水和气压头)驱动。

我国当前石油工业主要是采用对油层作用方法对油田进行开发。在这些条件下，《油藏驱动类型》概念已不能全面地反映采油过程的特征。例如，某油田是在一定时间内向油层注入液态二氧化碳，然后注入水，在油层内形成二氧化碳段塞。当然，可以认为其驱动类型为人工水压驱动。但这对于描述采油过程是太少了。必须考虑的不仅仅是驱动类型，而且还应考虑与油田开发工艺有关的采油机理。为了实现油田开发，就必须论证和选择的不仅仅是系统，而且还有开发工艺。

油田开发工艺是为采油所采取方式的总和。在上述开发系统概念里，作为其主要决定因素的是否采用对油层作用方法。油层的开发工艺并未包括在开发系统的定义里。对同一开发系统可以采用不同的油田开发工艺。当然，在作油田开发设计时必须考虑到，怎么样的工艺最适应所选择的系统，用怎么样的开发系统最容易达到所给的指标。

第三节 原油采收率

在整个开发过程中油藏驱动类型的效率指标是原油采收率(原油采出完全程度)。采收率可分为最终采收率，当前采收率和设计采收率。

当前采收率(又称为采出程度)为到一定日期由油层采出油量与平衡表内储量的比值。当前采收率在采油过程中随时间增长。最终采收率是在整个开发期间能采出的油量与平衡表内储量的比值。设计采收率不同于最终(实际)采收率，它是在原油储量计算和开发设计

阶段论证和规划的。

在矿场实验和统计矿场资料基础上可以认为，最终采收率取决于油藏驱动类型，不同驱动类型的采收率见表 1-2。

表 1-2 不同驱动类型原油采收率

[按 G.J.Desorcy]		
驱动类型	采收率变化范围, %	注 释
一次采油:		
弹性驱	2~5	个别情况可达 17~40% 对于薄油层可低到 10%，但偶尔可高达 70%
溶解气驱	10~30	
气顶驱	20~50	
本驱	25~50	
重力驱	30~70	
二次采油:		
注水	25~60	个别情况可以高达 80%左右
注气	30~50	
混相驱	40~60	一次采收率低的为重油
热力驱	20~50	
三次采油(实验室)		
胶束, 表面活性剂, CO ₂	45~80	在其他采油方式之外再增加 5~15%
聚合物, 泡沫, 碱水		

由于压头驱动的采收率较高，采油速度也较高，所以在开发一开始最好就改变其天然驱动类型，建立水压驱动或气压驱动。弹性驱动总是会转变为其它驱动类型。当水驱混气原油时采收率可能会有某些提高，这是因为部分原油被不流动的气体所取代。

在压头驱动情况下，考虑到驱油过程的物理方面和液体向井系统的现实流动情况，采收率 E_R 可以用驱油效率 E_D 与油层体积波及系数 E_V 的乘积表示：

$$E_R = E_V \cdot E_D \quad (1-9)$$

驱油效率 E_D 为从水所接触的那部分单位岩石中驱替出来油的体积除以这部分岩石中总的含油体积。在数值上它等于油藏原始含油饱和度，即：

$$E_D = \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} \quad (1-10)$$

它取决于许多岩石物理参数，其中主要为：1)岩石的润湿性；2)孔隙大小及其渗透率分布；3)流体粘度；4)重力。此外冲刷倍数(注入工作剂与孔隙体积的比值)对它也有很大影响。

驱油效率可取为实验室对岩心水驱油实验所测定的最终采收率：

$$E_D = 1 - \left[\frac{S_{or}}{1 - S_{wc}} \right] \quad (1-11)$$

它也可以根据油水相对渗透率特性及油水粘度计算求得。根据贝克利—列维莱特前缘驱油理论由相对渗透率曲线和油水粘度可作出 f_w 曲线(见图 1-1)：

$$f_w = \frac{q_w}{q_w + q_o} = \frac{1}{1 + \frac{K_{r0}}{\mu_0} \frac{\mu_w}{K_{rw}}} \quad (1-12)$$

并从 $f_w=0$ 值和相当于束缚水饱和度的点向分流量曲线作切线，并将切线外推相关交于 $f_w=1$ 的含水饱和度值是油井见水时油层水侵部分的平均含水饱和度($\bar{S}_{wbt}$)。这时驱油效率为

$$E_D = \frac{\bar{S}_{wbt} - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \tag{1-13}$$

对于亲水高渗透孔隙介质，当原油粘度很低时，根据 М.Л.Суручев 的资料，水驱油效率可达 0.8-0.9，对于低渗透，局部亲油的孔隙介质，当原油粘度偏高时，驱油效率为 0.5-0.65，对于亲油油层，驱油效率不大于 0.25-0.4。当用高压气体，碳酸气和胶束溶液混相驱油时，即在消除毛管压力影响的情况下，驱油效率可达 0.95-0.98。

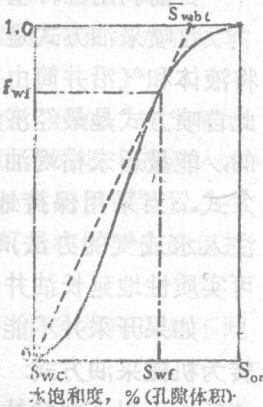


图 1-1 在分相流量曲线上求 $\bar{S}_{wbt}$ 值

波及系数 E_v 为注入流体所触及的孔隙体积，被该注采井网或研究的某部分地层总孔隙体积除后所得的商。体积波及系数相当于某一注采井网的平面

波及系数 E_A 与垂向波及系数 E_z 的乘积。1- E_v 表示在开采井排和注入切割井排之间水线收缩区未投入水驱开发，未泄油区和注水没有波及到地区(低渗透包物，油砂体和死油区)所占比例的大小。对严重分叉油层残余油饱和度可达 20-80%，这主要取决于布井，其打开油层条件，对孤立油砂体和小层的作用情况，以及流度比等。

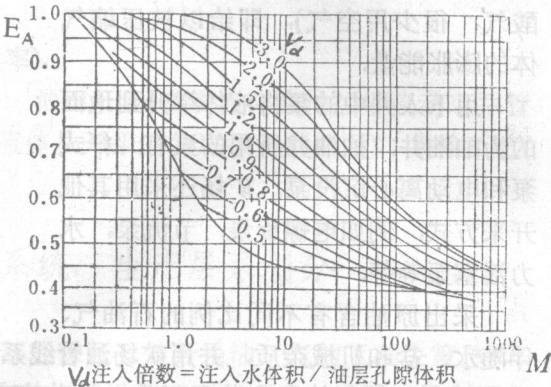


图 1-2 五点系统平面波及系数与流度比关系曲线

流度比 M 可以用来衡量一口井的注入能力和其产油能力的比值:

$$q_w / q_o = \frac{k_w F \Delta P / (\mu_w L)}{k_o F \Delta P / (\mu_o L)} = \frac{k_w / \mu_w}{k_o / \mu_o} = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = M \tag{1-14}$$

式中: k_w 是指油层水淹区内水相渗透率; 而 k_o 则是纯油区的油相渗透率。

流度比对平面波及系数的影响，已利用油藏模型对不同注水井网做了广泛研究，见水时平面波及系数受流度比的影响很大(随流度比的增加而降低)。图 1-2 为对五点系统平面波及系数与流度比的关系曲线。由该图可以看出流度比对平面波及系数的影响。由该图还可以看到，随着注入倍数的增长，平面波及系数也就增加。

第四节 油田开发和开采生产过程的结构纲要

目前我国每年由水驱油采出 90% 的原油。因此我们将对注水油田开发和开采生产过程的结构纲要作为主要的来研究。

油藏是油、气资源的天然来源，油藏用很多井来开采。按其功能可分: 1) 开采井用来采油、气和伴随水的，并具有自喷、泵或者气举装置的井; 2) 注入井，用来向地层注入水、蒸汽、气体或各种溶液的井; 3) 特殊井，为了完成特种测试和工作的井。