



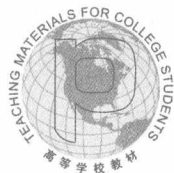
TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

油藏数值模拟基础

■ 李淑霞 谷建伟 编著

中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

油藏数值模拟基础

李淑霞 谷建伟 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油藏数值模拟基础/李淑霞,谷建伟编著. —东营:中国石油大学出版社,2008.11
ISBN 978-7-5636-2359-4

I. 油… II. ①李… ②谷… III. 油气藏—数值模拟
IV. P618.130.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 166601 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 油藏数值模拟基础
作 者: 李淑霞 谷建伟

责任编辑: 高 颖 (电话 0546—8393394)
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 0546—8392791, 8392563)
开 本: 180×235 印张: 18 字数: 360 千字
版 次: 2009 年 3 月第 1 版第 1 次印刷
定 价: 26.00 元

内容简介

本书系统地介绍了油藏数值模拟的基本原理和应用技术。主要包括数学模型的建立、差分方程组的建立及求解、一维和二维油藏问题的数值模拟方法等,并以黑油模型为例,介绍了数值地质模型的建立、历史拟合、结果分析和动态预测的整个过程。本书是作者多年来从事油藏数值模拟教学、科研工作的体会和经验总结。

本书可作为石油高等院校石油工程、应用物理、信息与计算科学、资源勘查工程等专业本科生的教材,也可供从事油气田开发的科研、生产和管理人员参考。

前 言

Foreword

油藏数值模拟是一门工程应用学科,它立足于流体在多孔介质中的渗流理论,利用数值物理方法和计算方法,通过编制计算机软件来求解油藏流体渗流问题。油藏数值模拟技术自 20 世纪 50 年代诞生至今,随计算机、应用数学和油藏工程的发展而不断发展,目前已成为油田开发方案设计、动态分析和油藏开发中后期方案调整的有效工具,在各油田开发生产中得到了广泛应用。近年来,油藏数值模拟技术发展较快,但迄今为止,在国内石油高校中仍没有一本系统地介绍油藏数值模拟基本原理及其应用技术的教材或专著,这大大制约了数值模拟技术的普及和推广。为此,我们特地编写了本书。

本书是作者在多年来从事油藏数值模拟教学和科研工作的基础上,查阅了大量的有关专著和文献编写而成的。本书重点讲述了油藏数值模拟的基本原理,同时还兼顾了数值模拟的应用技术。基本原理部分主要介绍了数学模型的建立、差分方程组的建立及求解、一维和二维油藏问题的数值模拟方法等。应用技术部分以黑油模型为例,介绍了从数值地质模型的建立、历史拟合、结果分析到动态预测的整个操作过程。通过本书的学习,能够使學生掌握油藏数值模拟的基本原理和应用,并能编制简单的数值模拟程序,为今后大型数值模拟软件的研制和应用奠定基础。

本书共分八章,其中第一章至第六章由李淑霞编写,第七章和第八章由谷建伟编写。研究生鲁轩和玄建协助完成了教学示范程序。全书最后由陈月明教授主审。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 8 月

目 录

Contents

第一章 油藏数值模拟简介	1
第一节 油藏数值模拟在油田开发中的作用	1
第二节 油藏数值模拟的主要内容和过程	11
第三节 油藏数值模拟的发展概况和发展方向	16
习题	24
第二章 基本数学模型	25
第一节 数学模型的构成及建立步骤	25
第二节 单相流的数学模型	31
第三节 两相流的数学模型	38
第四节 数学模型的一般式	42
第五节 多组分模型	44
第六节 黑油模型	47
第七节 定解条件	50
习题	52
第三章 差分方程组的建立	53
第一节 基本有限差分	53
第二节 差分方程组的建立	62
第三节 网格排列格式及其系数矩阵	71
第四节 差分方程的稳定性分析	82
第五节 边界条件的处理	87
习题	91
第四章 线性代数方程组的解法	92
第一节 线性代数方程组的直接解法	92
第二节 线性代数方程组的迭代解法	108
第三节 交替方向隐式方法	119
第四节 解大型稀疏线性方程组的预处理共轭梯度型方法	127
第五节 各种方法的对比	131
习题	133



第五章 一维油藏的数值模拟方法	134
第一节 一维油、水两相水驱油的数值模拟方法	134
第二节 一维径向单相流的数值模拟方法	145
习题	155
第六章 二维油藏的数值模拟方法	156
第一节 二维单相流的数值模拟方法	156
第二节 二维油、水两相流的数值模拟方法	166
习题	177
第七章 黑油模型	178
第一节 黑油模型及其隐压显饱解法	178
第二节 黑油模型中几个问题的处理方法	185
第三节 井的处理方法	193
第四节 黑油模型的其他求解方法	197
习题	204
第八章 油藏数值模拟技术在油气田开发中的应用	205
第一节 油藏数值模拟技术及特点	205
第二节 模型的建立	209
第三节 历史拟合	225
第四节 计算结果分析	239
第五节 方案预测	249
第六节 数值模拟实例	249
习题	261
附录	262
参考文献	278

第一章 油藏数值模拟简介

油气藏是在单一圈闭中具有同一个压力系统的油气聚集单元。在原始条件下,油气藏处于平衡状态;当受到干扰(如打井、生产)时,原来的平衡状态被打破,油气藏处于动态变化中。油气藏从投入开发到最后废弃就是一个不断变化的动态过程。

描述或实现油气藏动态变化的过程称为模拟(或仿真)。要描述或实现这一动态变化,可以有两种方法:①采用物理实体的方法,称为物理模拟;②采用数学描述的方法,称为数学模拟。油藏数值模拟是用数值的方法来求解描述油藏中流体渗流特征的数学模型,是一门将计算机、应用数学、油藏工程等相结合的综合性工程应用学科,在油气田开发方案设计和动态分析中具有十分重要的作用。

第一节 油藏数值模拟在油田开发中的作用

一、油田开发的任务

简单地说,油田开发的任务就是从油田的客观实际出发,以最少的投资、最合适的速度去获得最高的最终采收率,也就是要获得最大的效益。

从油田的客观实际出发,就是要以油藏描述为基础。不同油藏的沉积类型、地质特征和流体性质等均不相同,即使是同一个油藏,在不同的开发阶段,油藏岩石物性、流体分布等也会有较大的不同,因此必须对油藏进行精确描述。油田开发后期,还要对油藏做精细描述,但对油藏的精细描述是一个很复杂的问题。

最少的投资,这句话的意思很明确,因为油田开发最大的投资就是打井,所以应选择合理的井网,打最少的井,并降低打井的费用。

最合适的速度,是指采油速度要符合油田本身的客观规律,不可为追求产量而强注强采,破坏油层性质,从而导致后期的开发生产难度增大。此外,这里所说的开采速度还包括政治上和经济上的需要,如战争的需要、经济建设的需要等。

最高的最终采收率,是指最终要采出更多的油。

最大的效益包括社会效益和企业效益。如20世纪90年代初提出的“稳定东部,发展西部”就是从整体的社会效益而提出的,同时东西部各石油单位又要在此大方针的指导下保证自己的企业效益,因此社会效益和企业效益要有机地结合起来。



二、油田客观实际的复杂性

油田开发所面对的是不同地质条件和动态不断变化的各种类型的油藏,是油藏岩石和孔隙结构的复杂性、流体组成和物性变化的复杂性以及开发动态变化的复杂性的综合。

各个油藏的地质条件不同。从岩石类型来看,有砂岩、碳酸盐岩油藏等;从油藏类型来看,有构造、岩性油藏等。另外,即使是同一个油藏,由于沉积作用的影响,不同油层的性质也不相同。

油藏在整个开发过程中是动态变化的。油藏在投入开采以前处于原始的静止平衡状态。投入开采后,油藏的压力分布、流体分布等就处于动态变化之中,而且在油藏开采的整个过程中,这一变化是在不断进行的。由于油藏的非均质性,特别是在油田开发后期,各种提高采收率方法的使用,使得对上述动态变化的描述更加复杂。

油藏岩石物性和孔隙结构是十分复杂的。油藏岩石的有效厚度、孔隙度、渗透率等在平面和纵向上的分布和变化不同,其孔隙结构、孔道大小及分布、孔隙的连通情况等更是变化复杂。如果油藏还存在裂缝,则裂缝大小、形态及分布的描述更加复杂。

油藏中所含的流体性质及其在开采过程中所出现的物性变化也很复杂。油藏中所含的流体包括油、气、水。根据各个油藏所含的油、气、水组分的不同,可以将油藏划分为常规油藏、气藏、凝析气藏、稠油油藏等。油藏流体在高温高压的油藏条件下,油气相态、体积系数、溶解气油比、粘度、密度等性质会有较大的变化,油层中所含的流体与岩石相互作用所产生的物理化学现象更加复杂,例如毛管压力、相对渗透率、扩散、吸附等。另外,在二次采油之后,各种提高采收率方法如热力采油、化学驱、混相驱等的使用,也使得对油藏开采过程的描述更加复杂。

总之,油藏的复杂性是客观存在的。为了合理地开发油藏,编制符合油田实际的开发方案和调整方案,必须尽可能详细地对油藏进行描述。

三、油藏描述的研究方法

这里所指的油藏描述主要是指油田开发后对油藏动态的认识,特别强调对剩余油饱和度的认识,以便于提高开发效果。这与地质上的油藏静态描述有所不同。

油藏描述的研究方法主要有两大类,即直接观察法和模拟法。

1. 直接观察法

直接观察法是指直接在油田上进行试验或取得资料,以便进行分析的方法。直接观察法包括钻观察井、直接测试、开辟生产试验区 3 类方法。

1) 钻观察井

在勘探开发初期,直接从油层取心了解油层结构和岩石物性,或是在打加密井、更新井时直接对油层部位取心,分析岩石孔隙结构、物性及流体在油层中的分布。



2) 直接测试

直接测试法包括测井、井间地震、试井、井间示踪剂测试等很多测试方法,测试研究的范围可从微观的孔隙结构到宏观的井间连通情况。如 CT 测试、核磁共振、图像分析仪、微观驱油实验等研究油藏岩石的孔隙结构,精度可达 μm 级;实验室测油藏岩石的孔隙度、渗透率、孔道大小及分布等,研究精度为 cm 级;各种 C/O 测井、生产测井、伽马测井、电阻率测井、核磁测井、随钻测井,成像测井、核孔隙度-岩性成像测井、核磁共振成像测井等技术,测试研究的范围为测试井周围附近;井间地震、试井及井间示踪剂监测,测试研究的范围较大,可达上百米的井间区域。

3) 开辟生产试验区

对于大油田来讲,为了了解油田开发的全过程动态,在油田开发初期以及后期应用各种提高采收率措施时,应开辟生产试验区,以便指导今后整个油田的开发生产。我国大庆、胜利、吉林、辽河等各油田,都开辟过生产试验区。一般试验区的井组采用小井距,以加快试验速度,有效地指导后期的开发生产。大庆油田从开发开始,就强调了开发试验的重要性,前后共开展了约 300 多项规模不等的开发先导性试验,在油田开发史上功不可没。

如大庆油田在开发初期进行的小井距试验,有 2 个三角形井网试验井组,每个井组 7 口井,其中注水井 3 口,生产井 1 口,平衡井 3 口,井距 75 m。试验区有 3 套主力油层,从上至下为萨 II⁷⁺⁸、菊 I¹⁻²、菊 I¹⁻⁷。试验由下而上逐层进行,分别进行单层注水和提高采收率试验,从而总结规律。

又如大庆油田的聚合物驱采油技术,在大量基础研究和可行性研究的基础上,于 1972 年 8 月在小井距生产试验区进行了首次聚合物驱探索性试验,并取得了提高采收率 5.1%,吨聚合物增油 153 t 的良好效果。在先导性试验取得较好效果的基础上,为了进一步确定大井距、多井组的聚合物驱油效果,分别于 1992 年和 1994 年开展了 250 m 注采井距的聚合物驱工业化试验,取得了提高采收率 10% 以上,吨聚合物增油 150 t 以上的可喜成果。同时,加大了聚合物驱配套技术的攻关力度,形成了聚合物驱的 6 种油藏工程方法、10 项配套技术,为聚合物驱工业化推广应用的顺利实施提供了技术保障。

4) 直接观察法的优、缺点

(1) 优点:① 直观(看得见,摸得着),所得结果易于被人接受;② 准确(客观存在的,避免了人为误差)。

(2) 缺点:① 有一定的局限性(不能代表整个非均质油藏,只代表局部);② 成本高、周期长;③ 不能重复进行。

2. 模拟法

模拟就是用模型来研究物理过程。油藏模拟就是用油藏模型来研究油藏的各种物理性质及各种流体在其中的流动规律。



模拟法可分为两类,即物理模拟和数学模拟,简称双模。

1) 物理模拟

物理模拟是指根据同类现象或相似现象的一致性,利用某种模型来观察和研究其原型或原现象的规律性。这样的模型就是物理模型。物理模型包括相似模型和单元模型两种。

(1) 相似模型。

相似模型是根据相似原理,把自然界中的原型按比例缩小,并使原型中所发生的物理过程按一定的相似关系在模型中再现,例如水驱平板模型、蒸汽驱中的各种井网模型等。相似模型主要用于与数值模拟结果进行对比分析,研究数值模拟中难以确定的过程和现象,例如高温或高压条件下流体与岩石、流体与流体的物化作用,观察各种驱动条件下的现象,例如蒸汽超覆等,以研究影响驱油效率的因素,预测不同井网、完井方式、生产和注入动态下的开发指标,确定最佳方案。利用相似模型,通过短期小型实验,可以快速和直观地观察到油藏中的渗流过程,测定所需的数据,从而指导油田的开发实践。为了使模型中的物理过程和原型相似,除了使模型的几何形态与所要模拟的油藏或区块相似以外,还必须从流体力学的理论出发,根据相似原理,提出相似准数,实现流体力学相似。这样,从理论上讲,模拟后所得的规律应该与原型的规律相似,将相似的模型所得的结果经过还原就可直接用于原型。但实际上,要在实验室内严格地满足所有的相似条件是非常困难的,有时甚至是不可能的。因此,在进行模拟研究时,应根据所研究问题的性质,具体地加以分析,抓住主要矛盾,确定哪一些相似准数起着主导的、决定性的作用,哪一些准数是次要的,可以忽略。只要抓住主要矛盾,就可以在一定程度上真实地反应油藏流体的运动规律,从而加深对油藏动态的认识。

(2) 单元模型。

单元模型是由实际的或模拟的油藏岩石和流体所构成的,实验时不按相似关系进行模拟,因而所得的结果也不能直接推广到实际油田。但这种模型可用来研究油藏内各种物理现象的机理,所以单元模型研究也是实验室经常采用的研究方法,例如驱替岩心、填砂管模型等。

此外,物理模拟根据研究的目的不同还可以分为定性物理模拟和定量物理模拟。定性物理模拟的目的是了解油层中所发生的各种现象,如蒸汽驱过程中的蒸汽超覆现象、混相驱过程中的弥散现象等。定量物理模拟是为了得到油田开发过程中的有关定量参数,如采油速度、注采比、采收率等。

2) 数学模拟

数学模拟是指用数学模型来进行研究,即通过求解某一物理过程的数学方程组来研究这个物理过程变化规律的方法。自然界的物理现象常常可以用某一数学方程组来进行描述,这种方程组就称为原现象的数学模型。因此,所谓的数学模型并不是一



个实体模型,而是从物理现象中抽象出来的、能够描述该现象物理本质的一组数学方程组。数学模型的核心问题是把地层流体在孔隙介质中的渗流机制描述清楚,并施加一定的初始、边界条件,则可以相应地求出地下流体的压力、饱和度等参数,从而认识地下流体运动的规律。

数学模型有以下 3 类:

(1) 水电相似模型。

根据多孔介质中的渗流过程与导电介质中电的流动过程相似的原理来进行模拟研究。简单地说,在多孔介质中牛顿流体层状渗流时流量与压差成正比,与渗流阻力成反比。同样,在导电介质中,电流与电压差成正比,与电阻成反比。这两者是相似的,服从同一数学规律,在数学上属于同一类方程。因此,虽然水电相似模拟看起来似乎是物理模拟,但实质上却是一种数学模拟方法。由于电模型的制作和测量要比渗流物理模型容易得多,因此人们就用各种电模型如电网模型、电解模型等来研究渗流问题。但近年来,由于电子计算机的飞速发展,以及用电模型模拟渗流问题所能考虑的因素有限等原因,这些模型在油藏模拟方面的应用已越来越少。

(2) 解析模型。

用数学方法求解数学模型是最常用的方法。长期以来,人们一直用经典的数学解析方法来求数学模型的解析解,也就是精确解。由于该法能直接求出各种物理量之间的数学函数关系,所以易于得到比较明确的物理概念,这是解析方法的一个很大的优点。但是,这种解析方法只能解一些比较简单的渗流问题,而对于考虑各种复杂因素的渗流问题,如油层复杂的非均质变化及多维多相多组分等的渗流问题,它就无法解决了。对于油田开发方面越来越多地使用的各种提高采收率的新方法如火烧油层、注蒸汽、注化学剂等的驱油过程,就更无法用解析方法来求得各种复杂过程的精确解了。因此,20 世纪 50 年代以来,随着电子计算机的发展及数值求解技术的广泛应用,人们开始使用数值模型来求解问题。

(3) 数值模型。

用数值方法求解数学方程式是一种近似的方法。用解析方法求得的解是用公式表达的各物理量间的函数关系。数值方法求得的解不是一个数学函数关系,而是分布在足够多的点上的一系列离散数值,以这些数值来近似地解答问题。虽然这只是一种近似的方法,但是只要所求解的点数足够多,就可以以足够的精度逼近解析解,更重要的是它可以使复杂的偏微分方程的求解成为可能,从而能够在满足工程问题所需精度的情况下解决用传统的解析方法所不能解决的问题。

因此,用数值方法来求解描述油藏中流体渗流特征的数学模型,从而形成了油藏数值模拟的最重要的分支——油藏数值模拟。特别是近年来,大型快速电子计算机的发展为油藏数值模拟的发展提供了强有力的保障,使其成为现代油藏工程中不可缺少的研究工具。现在,油藏数值模拟方法已用于解决大量的复杂油藏工程问题,如砂岩



油藏中考虑油层中各种非均质变化以及重力、毛管压力、弹性力等各种作用力的三维三相多井系统的渗流问题,考虑多相、多组分间相平衡关系和传质现象的多相、多组分三维渗流问题,底水锥进问题,碳酸盐岩的双重介质渗流问题等;在注蒸汽、火烧油层、注聚合物、注胶束溶液、混相注气等包括各种复杂的物理化学过程的渗流问题研究中,也已取得了显著效果。数值模拟方法不仅在理论上用于探讨各种复杂渗流问题的规律和机理,而且还普遍用于油藏开发设计、动态预测、油层参数识别、工程技术问题的优化设计以及重大开发技术政策的研究等。目前已经发展了成套的数值模拟软件,可用于各种类型油气藏的开发研究。近年来更朝着向量化、集成化、模块化和智能化的方向发展,用来解决大型油田的模拟问题,以及各种更为复杂的问题。

解析方法和数值方法是油藏数学模拟中使用的两种不同的方法,不能偏废。对于一些比较简单的工程技术问题,一般应用解析方法的成果就已足够,而且这种方法物理概念明确,比较简单,易于为广大技术人员所掌握,因此仍有其广阔的应用范围。但是对于许多复杂的、解析方法无法解决的问题,就要用数值模拟方法。在许多实际问题中,这两种方法也可以结合使用。

3) 双模的关系

物理模拟和数学模拟都是研究油藏渗流规律的重要手段,两者各有优缺点。物理模拟的主要优点是能够保持和模拟原型的物理本质,这是其他方法所不能代替的。特别是对那些渗流机理还不够清楚的问题,首先要靠物理模型来进行研究,才能正确地从中抽象和提炼出反映其物理本质的数学关系,建立数学模型。即使对于已建立的数学模型及所求出的数值解,也常要靠物理模型来进行检验、改进和完善。因此,可以说物理模拟是数学模拟的基础。但是,由于实际油田的渗流问题十分复杂,如考虑各种非均质因素的多维、多井等问题,要用物理模型进行完全严格的模拟是不可能的,而且物理模拟往往要花费大量的人力、物力,试验周期比较长,测量技术方面存在不少困难。所以,现在很少用大型的物理模型来模拟复杂的地质条件。而数学模拟恰恰在这方面有优势,它费用低、速度快,对于地质条件十分复杂的渗流问题,也可以在短时间内进行多种方案的运算和对比。因此,物理模拟和数学模拟两者是相辅相成的,在油藏的开发和动态分析中都是必不可少的工作,不能互相取代。物理模拟多用来进行物理机理的研究,并为数学模拟提供必要的参数,验证数学模拟的结果,提出新的更完善的数学模型等;物理模拟中的某些计算,则往往又要依靠数学模拟方法。目前,解决大量的、需要考虑多种复杂因素的实际问题时,主要使用数学模拟。

4) 模拟法的优、缺点

(1) 优点:① 能重复进行,即所谓的“多次开发”,特别是对数学模拟;② 时间短、成本低;③ 可以模拟各种非均质情况。

(2) 缺点:① 模型有一定的假设条件,与真实情况有差别;② 模拟需要依赖于油藏的静、动态资料;③ 受计算机计算能力的限制(对数值模拟而言)。



四、油藏数值模拟在油气田开发中的作用

1. 油藏数值模拟的用途

通过油藏数值模拟计算,可以对油藏进行正确的认识和描述,研究油藏的各种驱替机理和渗流规律,此外还可以通过油藏数值模拟计算,对油藏未来的各种开发方案进行动态预测。

1) 油藏描述

油藏描述是油田开发的基础,是一项系统工程,是多学科各种方法联合研究的结果。油藏描述是综合应用地质、地震、测井和油藏工程等资料,研究全油田的构造面貌、储集层的几何形态和岩性岩相、储层微观特征、流体性质和分布规律,定量描述储层参数的空间分布规律、储层非均质性,计算油气地质储量,建立油藏地质模型,进行油藏评价,研究油田开发过程中油藏基本参数的变化,从而实现对全油田油气藏进行静态和动态的详细描述。目前,油藏描述的技术和方法主要有细分沉积微相研究技术、高分辨率层序地层学应用技术、储层物性动态变化空间分布规律研究技术、流动单元空间结构研究技术、油藏数值模拟技术等。

进行油藏数值模拟时,首先要建立能够反映油藏实际状况的地质模型,包括油藏构造、几何形态、储层基本性质、流体性质及分布等,然后输入油藏的实际生产动态资料数据进行拟合计算。若计算结果与实际生产动态不吻合,则修改前面输入的地质模型后重新计算,一直到计算结果与实际动态相吻合,则前面修正的地质模型即为对油藏的正确描述。

2) 驱替机理和渗流规律

利用室内实验资料和渗流力学的基本原理,我们可以认识到各种驱替现象和过程,利用数值模拟手段可以将基本的渗流机理和现象描述得更加形象和直观。

利用数值模拟计算描述油水渗流的机理,首先需要构建反映地层情况的数值地质模型,在给定各种限制条件的情况下计算油水的运动规律和动态。例如要研究厚油层中的油水分布特征,首先需要建立起反映厚油层特征的地质模型。比较常见的模型是正韵律和反韵律地层模型。地层的韵律性需要从地层渗透率在纵向上的分布反映出来,可以建立一个多层的地质模型,如果模型中地层的平均渗透率从底部向上部依次增加,反映地层具反韵律特征;反之,如果地层的渗透率从底部向上部依次降低,则反映地层具正韵律特征。平均渗透率在垂向上的变化规律符合哪种特征需要根据具体的油藏特征来决定,不同的垂向上渗透率的变化规律也会决定地层中不同的剩余油分布模式。由于油水之间存在密度差,注入水倾向于向地层的底部突进。对于正韵律地层,由于纵向上渗透率的变化更加增加了这种特征,因此正韵律厚油层底部水淹比较严重,而上部水淹比较轻。对于反韵律地层,由于油水密度差的影响与渗透率的影响趋势相反,反韵律地层的水淹相对于正韵律地层比较均质,相同的开发阶段内反韵律



地层的开发效果要好于正韵律地层。利用数值模拟方法可以轻松地计算出以上韵律性地层的水驱动态,不同地层的水驱特征明显。图 1-1-1 所示为正反韵律油藏的水驱特征。

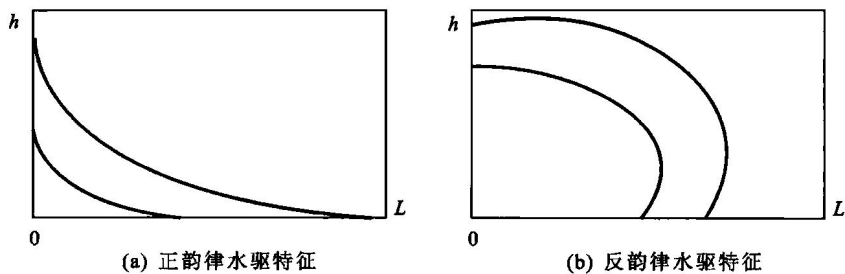


图 1-1-1 不同韵律性油藏的水驱特征

对于油气田开发过程中所涉及的各种油水运动规律和特征,一般都可以通过数值模拟来研究和分析。

3) 动态预测

通过油藏数值模拟,在对开发历史进行拟合的基础上,可以预测油藏今后的生产动态,如油藏含水率的变化、最终采收率等,从而为油藏管理人员提供决策依据。

动态预测是油藏数值模拟中非常有意义的工作,对大多数油藏来讲,进行数值模拟的目的最终都是为了要对油田未来的动态作出预测。它可以预测某一油藏在不同开发条件下的动态,也可以预测同一油藏在不同描述下的动态,使我们在油藏开发之前就能了解到某口井、井组甚至整个油藏在不同开发方式下的生产动态情况,从而选出最适合的方案作为最佳实施方案。

2. 油藏数值模拟在油气田开发各个不同阶段中的作用

随着计算机和计算技术的发展及数值模拟软件的不断发展和完善,油藏数值模拟目前已发展成为一种比较成熟的技术,被油藏工程师广泛用于油田开发的各个阶段。在油田开发的各个不同的阶段,油藏数值模拟具有不同的特点,并都能发挥其重要作用。

1) 油田开发前期评价阶段

当油藏地质储量已初步确定并打了少量评价井后,油田准备投入开发但尚未开发的阶段,油田要进入前期评价。因为这时只有少数评价井的资料,这些资料尚未达到做正式开发方案的要求,所以这一阶段首先要评价经济开采的可行性,然后再确定是否要再打评价井。此外,经济上的边际油田、油层埋藏深的油田和海域、沙漠等环境条件差的油田,也需要在评价开采的经济可行性后,决定是否要打足够的评价井。数值模拟是这一评价阶段应做的工作。很显然,这一阶段数值模拟工作面临的主要困难是资料不充分。有些人因此认为该阶段数值模拟输入参数不准确,计算结果必然不能用,因而对在这一阶段做数值模拟工作持否定态度。这种看法有片面性,因为无论在



哪一开发阶段,资料的“齐全”都是相对的,都只能依据油藏局部的实测资料来推测全部的油藏情况,同时,任何一种方法或技术都只能从某一角度研究油藏,在综合各方面的研究成果后,才可能较全面地认识油藏。当然,资料不充分,必然影响数值模拟结果的准确性,但对油藏的认识只能逐步深化。在油藏早期评价阶段,如果能充分分析、利用已有资料,则数值模拟工作的意义不仅体现在能获得模拟计算结果上,更重要的是通过对模拟结果的分析,可以提出要深入研究的问题,进而提出对下一步工作的建议。因此,在油田开发前期,利用油藏数值模拟可以评价油藏经济开采的可行性,并进行油田开发的初步方案规划。

油田开发前期评价阶段,数值模拟工作应注意以下几点:

(1) 要和地球物理学家、地质家密切配合,具体了解地质建模过程,了解各种资料的可靠程度,要重视不同的地质认识。

(2) 要抓住重点,有针对性地做数值模拟工作。这一阶段一般不需要也没有条件做全部的数值模拟工作,只要根据急需解决的问题做些研究性的工作即可,例如:

① 拟合测试或试采过程。目前试井解释方法以解析解为基础,为了求解,必须简化油藏条件。采用数值模拟方法拟合,可以较全面地反映井筒附近的油藏特征(非均质性、垂向渗透率与水平渗透率的差异和层间的差异等),以提高试井解释参数的精度。

② 用单井径向模型模拟底水油藏在不同射开程度下的含水上升规律和单井累积产量。对边部油井还可用三维径向模型模拟边、底水共同作用下的油井动态。

③ 用单井或井组模型(在注气条件下需用井组模型)预测产能及产量变化规律。进行其中的②类、③类模拟工作,常常能得到边际油田是否能经济开采的初步概念,这在油藏早期评价阶段是十分重要的。

(3) 在地质认识有分歧的情况下,有时需要按不同意见分别建立模型进行模拟,以了解不同的地质认识所表达的地质情况对今后油田开发的影响。

(4) 根据对模拟结果的分析,提出所模拟油藏经济开发的可行性,如有可能开发,则提出下一步工作意见和所取资料要求。

2) 油田开发方案编制阶段

油田开发前期评价以后,有部分井已投入生产(试采)并获得工业性油流,这时可利用数值模拟进行油田开发方案的编制。在开发方案中要明确油田的开发指标,其中包括注采井网的形式、采油速度、转注时机、层系的划分等。对这些指标的优化,都可以采用数值模拟计算不同开发方式的开发指标,再结合经济评价确定最合理的开发方式。在这一点上,充分利用了数值模拟可以“多次重复、成本低”的特点,可以设定多种条件来模拟计算不同开发方案下的开发效果,以取得最优的决策。目前在编制油田开发方案时,数值模拟已成为一种不可缺少的手段,在实施方案的可行性评价,选择开发层系、井网密度、最佳井位,选择注水方式,进行合理的配产配注,对比不同开发方式的



开发效果,进行不同方案的效果预测等方面,具有其他方法无法相比的优势。数值模拟方法应用得最广的是优选方案,计算方案指标时应注意以下几点:

(1) 方案编制阶段的资料仍然不够充足,应研究对方案指标敏感参数的可能变化范围,需要时应该计算不同方案指标的可信度。

(2) 要明确数值模拟可以解决的问题和不敏感的问题(如采油速度对采收率的影响等),不要轻易根据数值模拟结果对不敏感的问题下结论。

(3) 计算方案指标时一般应做全油田三维模拟,这样可以考虑油藏的几何形态以及井间和层间干扰等问题。

3) 油藏管理及油田开发方案调整阶段

概括地说,油藏管理就是要通过各学科的协同工作,尽可能地增加油藏的经济可采储量,从而提高经济效益。在油藏管理工作中,数值模拟工作是重要的组成部分。对于一些重要油藏,在开发过程中应定期做数值模拟研究,若生产比较正常,2年左右做一次即可;但若出现问题,则应及时进行油藏描述和数值模拟工作。这一阶段的数值模拟工作关键是历史拟合。这是因为尽管编制油田开发方案时预测了油藏开发动态,但那时不可能深入、全面地认识油藏,因此实施过程中往往出现一些意想不到的问题。有了生产动态资料,就应该综合地质研究、数值模拟等多种方法,修正对油藏的认识,并在历史拟合的基础上,做不同操作条件下的动态预测,以指导生产管理。

调整是油藏管理工作的一部分。油田投入开发一定时间以后,要根据对油田地质实际情况的认识以及生产动态过程中所暴露出来的各种各样的开发矛盾,进行油田开发方案的调整。常规的调整措施主要有井网调整、层系调整、周期注水、调剖堵水、降压开采、改向注水等。具体采取什么样的调整措施,取决于地层中的油水分布规律和特征。在利用数值模拟方法编制调整方案时,首先要对已实施的开采过程做历史拟合,然后模拟计算不同调整方案的效果,以便从技术、经济角度选择最优方案。

4) 油田开发后期提高采收率阶段

当油田开发经过多次调整,提出改善开发效果和提高采收率的问题以后,油田开发进入后期。改善油田开发效果,主要应用水动力学的方法,如打加密井、完善井网、调剖堵水、强注强采、脉冲注水、周期注水等。提高采收率方法是指除天然能量开采和注水、注气(非混相)开采以外的提高采收率的三次采油方法的总称,主要包括热采、混相驱、化学驱等。

改善开发效果和三次采油机理比较复杂,在开采过程中不同方法有其各自的物理化学过程,因此在油田开发后期利用数值模拟来优选各种改善开发效果和三次采油方案时,需要有与各种方法相对应的数值模拟软件。目前有黑油模型、裂缝模型、热采模型、组分模型和化学驱模型等数值模拟软件。与黑油模型相比,其他软件技术的成熟性和可靠性要差些,但它们对基础资料的要求却比黑油模型高。因此,在开采后期做数值模拟工作时,要特别重视实验室和现场试验的资料。如果一批实验结果有较大差