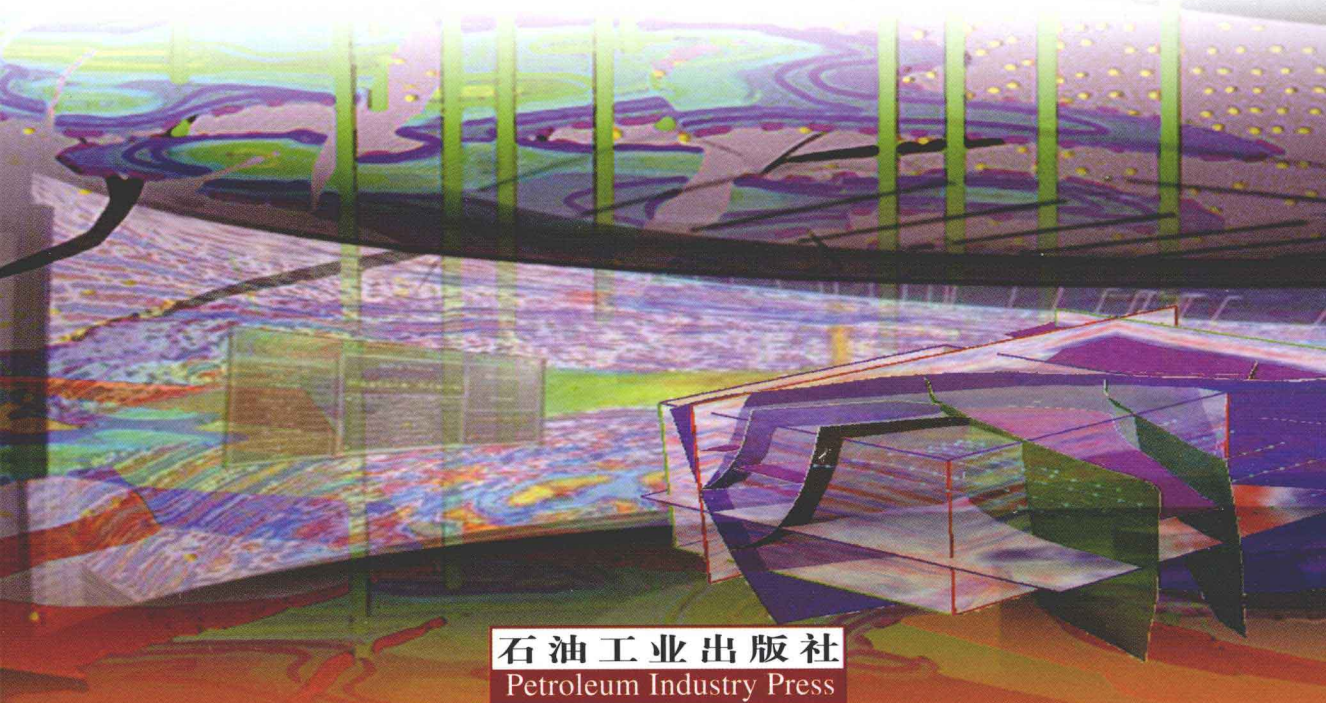




石油高等院校特色教材

实用气藏动态分析方法

王怒涛 黄炳光 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色教材

实用气藏动态分析方法

王怒涛 黄炳光 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了气藏动态分析方法,突出实例应用,主要包括流体与岩石基础参数获取方法、压力计算原理与方法、储量计算原理与方法、产能分析原理与方法、节点分析原理及应用、产量递减规律分析及应用、气藏动态分析与预测等内容。

本书可作为石油工程研究生教材,也可作为相关专业师生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实用气藏动态分析方法/王怒涛,黄炳光编著.

北京:石油工业出版社,2011.8

石油高等院校特色教材

ISBN 978-7-5021-8548-0

I. 实…

II. ①王… ②黄…

III. 气田动态-分析-高等学校-教材

IV. TE33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 133616 号

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

编辑室:(010)64240656 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油报印刷厂

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17.75

字数:448 千字

定价:30.00 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

天然气作为一种对于环境污染相对小的能源,越来越受到全世界的青睐;从环境保护和优化能源结构的角度来看,21 世纪将是天然气的世纪。我国实行油气并举的石油天然气开发战略,必将有利于并加速天然气工业的发展,加快天然气的勘探和开发有助于适应我国国民经济对天然气日益增长的需要。为适应我国天然气工业的快速发展,做好技术和人才的准备,本书在黄炳光、冉新权、李晓平等编著《气藏工程分析方法》与黄炳光编著《气藏工程与动态分析方法》的基础上,结合目前气藏动态分析最新方法与技术,做了适当补充和修订而成。

全书共分十一章。第一章绪论,介绍了气藏动态分析的特点、方法、内容以及在气田开发中的地位和作用。第二章气藏流体基本特性,介绍了气藏流体气、水的物性参数计算方法。第三章储层岩石物性特征,介绍了岩石物性参数概念以及数据的实测、计算及处理分析方法等。第四章地层热力学条件分析,介绍了地层压力、温度关系的应用。第五章压力计算方法,阐述了气井和气藏压力计算常用的基本方法。第六章气藏储量计算,介绍了常规气藏物质平衡通式的建立与简化,定容封闭气藏的储量计算,水驱气藏的储量及水侵量计算,凝析气藏物质平衡方程的建立与应用等,以及单井控制储量计算方法及实例分析。第七章气井产能分析,介绍了气井产能分析基本原理和一些特殊气井的产能分析方法。第八章临界参数的计算,介绍了底水气藏的临界产量、气井的临界携液量计算方法以及天然气水合物预测方法。第九章气井节点分析,介绍了气井的流入流出曲线及敏感性分析。第十章产量递减规律,介绍了产量递减规律的理论及应用。第十一章气藏动态分析与预测,介绍了干气气藏和水驱气藏动态分析与预测方法。

本书具有很强的实用性和广泛性,主要以介绍气藏动态分析方法为主,实例分析介绍为辅助,便于这些理论与方法在气藏动态分析中更好的应用,为气藏工程设计与气藏动态分析提供切实可行的研究和分析方法。

本书在编写过程中,引用了一些资料文献,未能一一列出,同时,西南石油大学李士伦教授,四川油气田分公司、西南油气田分公司、塔里木油田分公司等单位许多专家对本书的编写提供了帮助和指导,也得到了西南石油大学教务处、石油工程学院的大力支持,在此一并表示真诚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免有缺点和不足之处,请读者批评指正。

编 者

2011 年 3 月于成都

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 气藏动态分析的特点	(1)
第二节 气藏动态分析在气田开发中的地位和作用	(6)
第二章 气藏流体基本特征	(8)
第一节 天然气高压物性参数计算	(8)
第二节 地层水的物性参数计算	(34)
第三章 储层岩石物性特征	(37)
第一节 储层岩石孔隙度	(37)
第二节 储层岩石渗透率	(40)
第三节 储层岩石压缩性	(45)
第四节 渗流物理实测数据处理	(46)
第五节 毛管压力曲线特征参数计算	(51)
第六节 储层岩石敏感性评价	(57)
第四章 地层热力学条件分析	(61)
第一节 地层温度	(61)
第二节 地层压力	(63)
第五章 压力计算方法	(67)
第一节 单井井底压力计算	(67)
第二节 气藏平均地层压力计算	(86)
第六章 气藏储量计算	(88)
第一节 气藏类型判断方法	(88)
第二节 容积法计算气藏储量	(90)
第三节 单元体积法计算气藏储量	(92)
第四节 物质平衡法计算气藏储量	(93)
第五节 气井单井动态储量计算	(127)
第七章 气井产能分析	(149)
第一节 稳定渗流及气井产能方程	(149)
第二节 稳态气井产能测试方法	(169)
第三节 稳态气井产能分析方法	(174)

第四节	非稳态分析方法	(182)
第五节	气井动态产能分析方法	(192)
第六节	气井产能影响因素分析	(202)
第八章	临界参数的计算	(206)
第一节	底水驱气井临界产量的确定	(206)
第二节	积液气井的最小流速	(215)
第三节	水合物生成预测	(221)
第九章	气井节点分析	(224)
第一节	气井生产系统分析	(224)
第二节	普通节点分析	(232)
第三节	函数节点分析	(240)
第十章	产量递减规律	(246)
第一节	产量递减基本概念与模式	(246)
第二节	产量递减规律判断与类型	(247)
第三节	产量递减规律分析	(250)
第四节	产量递减规律应用	(252)
第五节	现代产量递减规律分析	(254)
第十一章	气藏动态分析与预测	(264)
第一节	气藏动态分析的主要内容	(264)
第二节	定容封闭气藏动态预测方法简介	(264)
第三节	水驱气藏动态预测方法简介	(267)
参考文献		(271)

第一章 绪 论

气藏动态分析贯穿于整个气藏开发的始终,从气藏钻完第一口发现井,到气藏达到最终废弃压力而放弃,整个气藏寿命期内,气藏动态分析工作一直在不间断地进行,其目标就是采取各种经济、科学、实用的技术、经济分析手段,认识气藏特征、合理开发气藏、预测开发动态、调整开发措施,使气藏的开发达到综合效益最大化。

第一节 气藏动态分析的特点

一、气藏动态分析的目的

气藏动态分析是气田开发管理的核心,它贯彻于气田开发的始终,涉及面广。只有掌握气藏的开采动态和开发动态,研究分析其动态机理,不断加深对气藏的开采特征和开采规律的认识,才能把握气田开发的主动权,编制出最佳的开发方案、调整方案,提出合理的调整措施和切合实际的生产规划,达到高效、合理和科学开发气田的目的,取得最佳经济效益,并指导下游工程的健康发展。

认识气藏的目的是开发好气藏,通过一系列气藏动态监测及动态分析方法认识气藏后,就要针对气藏的特征、流体渗流规律选择合理的开发方式,预测动态可采储量、各项开发指标,并随着气藏的开发逐步加深对气藏的认识,充分利用其自然规律,调整开发策略,使气藏开发达到最大效益。

二、气藏动态分析的特点

1. 具有实用性特点

对气藏储层、流体实验数据、生产数据、监测数据进行分析,既避免大量繁琐复杂的理论计算,又能够满足气藏开发动态分析所应有的精度要求,从矿场实用角度提供认识、分析研究预测气藏特征、流体运动规律的方法,指导气藏的开发,分析预测气田开发中出现的动态变化,提出气田开发调整的措施及意见,提高气田开发的技术经济等各项指标。

2. 尊重实践的特点

气藏动态分析是方法性应用科学,其分析研究的对象是来源于实验室、矿场实际测试、生产等的第一手资料,必须符合现场实际生产。

3. 具有极强的综合性特点

气藏动态分析方法的主要理论依据是油层物理学、流体渗流理论和统计学原理等,其分析方法要综合运用各种实验、理论计算、数据处理等手段。

4. 具有计算机辅助计算的特点

由于分析计算数据量庞大,手工计算已远不能适应现代气藏动态分析的要求,计算机及相应的计算软件是气藏动态分析方法必不可少的工具。因此,气藏动态分析方法必须具备计算机辅助计算的特点。

三、气藏动态分析的一般研究方法

气藏动态分析的主要方法以“油层物理”、“油气渗流力学”等为基础,采用“油气藏数值模拟”、“现代计算数学”为手段,结合油气藏动态分析方法中的“物质平衡原理”以及一些油气开发过程中积累和总结的十分有用的经验公式和方法,来分析气井或气藏生产动态,如图 1-1-1 所示。

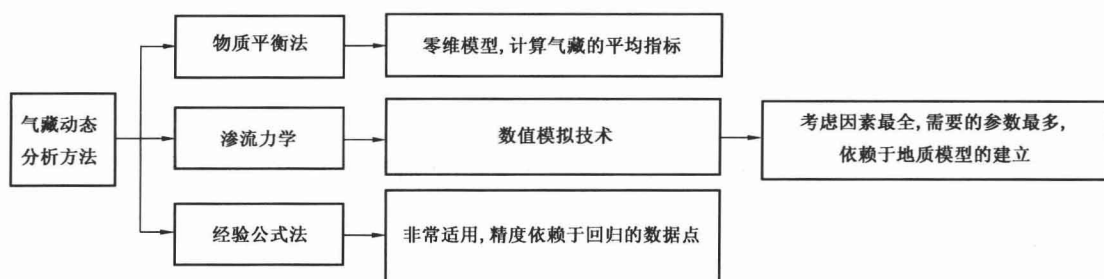


图 1-1-1 气藏动态分析的主要方法示意图

四、气藏动态分析的主要研究内容

气藏动态分析的研究方法同其他科学有着相似之处,依据一定的理论,认清研究的对象,研究其内在规律,为气田开发服务。气藏动态分析研究的对象是气井和气藏,主要是从单井分析入手,包括储层地质特征、储层流体的特征及流体在其储层中的流动规律。气藏中主要流体是天然气和水,对于凝析气藏流体含凝析油,要研究流体在地下条件、地面条件下的各种特征,更要研究其在地下条件到地面条件下的变化过程及相应特征参数的变化规律。由于天然气的特殊性,不同组分的天然气特征参数随压力、温度等条件的变化很大,随之引起其相对密度、粘度、体积系数等参数的变化,进而影响气藏生产动态的变化,影响最终采收率;认识气藏,还要研究气藏储层的物理特征,如储层岩石的压缩系数、储层的渗透率、孔隙度、岩石的敏感性等特征,及其随压力温度等的变化,进而描述气藏中流体的渗流环境及变化。认识气藏最重要的是研究气藏中流体的渗流规律,为合理开发气藏提供技术指导。

认识气藏特征参数要通过一系列实验、现场测试资料分析、计算机辅助手段等方法进行。认识气藏渗流规律主要通过理论推导、计算机模拟等气藏动态分析方法、手段确定在开发生产过程中气藏流体、气藏储层特征等所遵循的规律,如通过利用 pVT 实验,认识分析天然气在高温高压下的特征及其变化过程等;通过试井资料分析,获得气井实际生产时的产能、相应储层的生产特征参数;通过数值模拟计算分析,可以得到不同开发方式、不同开采速度等开发策略下,对气藏各项开发技术指标的影响。

对于动态分析体系中首先从单井动态分析入手,再到层系(区块)动态分析,最后到气田动态分析。不论是单井还是层系(区块)和气田动态分析,只是分析的侧重点不同,但都要落实到单井动态分析上,因此单井分析是基础(图 1-1-2)。

不论是单井动态分析,还是层系动态分析以至于整个气藏动态分析,最终归结起来动态分析最主要的内容在于三个方面:首先回答气藏储量有多大(包括静态地质储量和动态地质储量以及可采储量等),其次回答产能规模多大,最后回答这样大的产能规模下是否具有经济效益的问题,从而确定气井(气藏)的开发潜力与开发对策(图 1-1-3)。

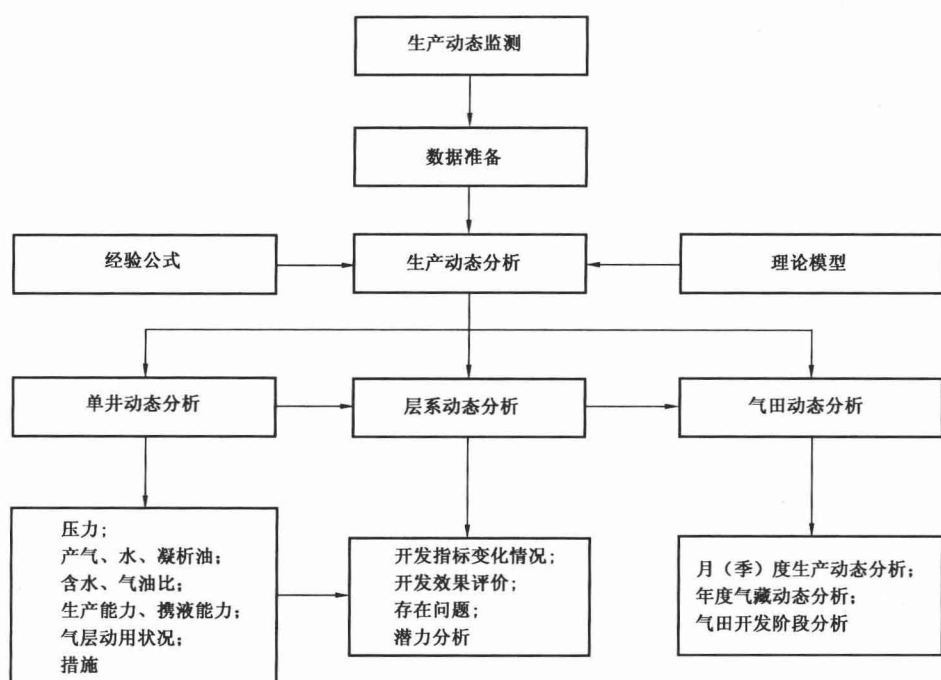


图 1-1-2 动态分析体系示意图

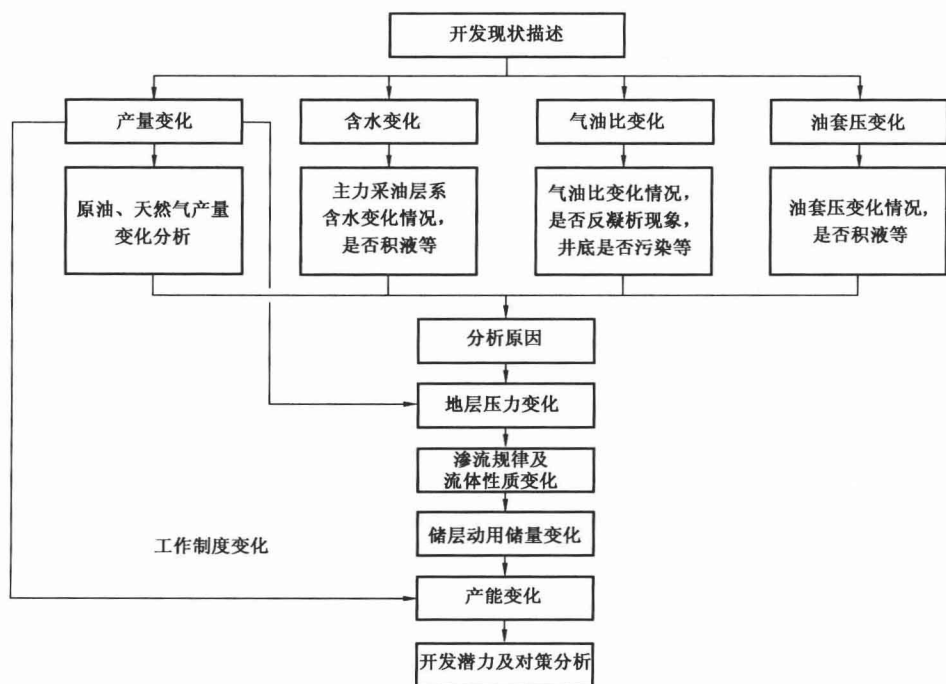


图 1-1-3 气井(藏)动态分析的主要内容

下面简单介绍动态分析中的主要几个内容情况,详细见相应的章节。进行动态分析之前首先进行动态数据的监测、收集与处理,然后才进行各项分析。

1. 数据准备

数据准备主要准备动态分析所需要的岩石和流体的静态数据与动态数据,它是动态分析的基础,主要包括以下几方面:

(1) 储层参数的确定。

气藏储层重要的参数是孔隙度、渗透率和饱和度,以及区域的应力状况。评价这些参数的手段主要包括测井解释、岩心实验室研究、地层测试分析等方法。孔隙度的确定方法主要有实验室测定方法、图像分析器方法、测井解释方法。在确定气藏储层孔隙度时,要用多种方法求得结果,相互验证,从而作出准确的评价。渗透率的确定方法主要有稳定驱替法、非稳定驱替法、不稳定脉冲测量法等。含水饱和度的分析确定方法主要有岩心分析法、测井资料计算法。区域应力分布资料是为在储层中进行钻水平井或措施改造评价储层潜力的重要特征参数,获取应力的方法主要有从测井资料和岩心测试中计算岩石的弹性特征和地层应力、岩心弹性特征实验、实际应力测试等。

(2) 流体性质的研究。

流体性质的研究是指气藏中天然气的组成、天然气的相态特性、天然气的粘度等的研究。

(3) 地层测试分析的研究。

通过地层测试分析可以获得气藏的渗透率、压力、产能、流体性质等资料,如果测试时间长,还可以探测气藏的边界,为气藏的评价及气田的开发提供可靠的科学依据。

(4) 气藏压力和温度的研究。

气藏压力和温度对天然气在地下储层的渗流、相态的变化具有重要的影响,掌握储层的压力、温度,是气藏开发的基础。气藏是依靠储层弹性能量开采,而压能则是能量的直接表现,准确地研究和掌握气藏压力的变化,及开发过程中的压降是优化生产的重要依据。确定气藏温度、压力的方法主要是用各类压力测量仪器在井下测试分析得到。

(5) 试井解释。

气井试井的首要目的是确定在不同的地层压力和井底压力条件下,气井的产气能力,为气田动态分析和制定开发方案提供依据。另一目的是确定表皮系数和储层参数,为实施增产措施提供依据。

2. 储量计算方法的研究

气藏储量(包括静态地质储量和动态地质储量)是确定气藏规模的重要参数。其常用的计算方法主要有容积法和物质平衡方法。

容积法计算气藏储量,主要用于气藏评价和早期开发阶段,用这种方法,通过估算气藏中被烃类所占据的岩石孔隙体积确定原始天然气储量。利用容积法计算天然气原始储量可归纳为依次计算天然气储层体积,乘以孔隙度得到储层孔隙体积,再乘以含气饱和度得到储层中烃孔隙体积,再除以天然气体积系数即得到天然气原始地质储量。

在计算上述各量中,要注意方法和技巧,关键在于这些参数取值准确与否,如在计算储层总体积时,按照构造图上气藏的实际边界及气水接触位置确定计算范围,对于底水气藏,储层总体积完全由储层顶部构造图和气水接触面的位置确定;对于其他情况,还需要知道储层底部构造图才能确定储层的总体积。确定孔隙体积时,对于纵向或横向或纵横两个方向上的孔隙度变化不大的气层,可采用简单的平均值法求得:先求出单井储层的纵向平均孔隙度,然后求

取各井孔隙度的算术平均值,即为气藏平均孔隙度。如果气层孔隙度在纵向或横向或纵横向两个方向变化很大,则孔隙度应由等孔隙度—厚度图求得。该图画出孔隙度与厚度乘积的等值线,利用类似于用构造图求储层总体积的方法求取孔隙体积。气体体积系数取决于气藏的压力和温度及偏差因子 Z 值。通常情况下,压力和温度的变化所引起的气体体积系数变化很小。由于体积系数较小,很小的偏差会引起较大的误差,通常将地层体积系数转化为偏差因子计算。

物质平衡法计算气藏动态储量主要依据气藏的动态数据,需要一定的开采资料。所计算的储量也可以称为动用原始地质储量。一般认为,物质平衡法在采出储量的 10% 时的计算结果是比较可靠的。

当气藏边底水不活跃、属弹性气驱的气藏,可视为纯体积衰竭,即衰竭过程中烃孔隙体积保持不变, p/Z 和累积产气量 G_p 之间可表示成线性关系方程,在 G_p 轴上的截距等于干气原始储量。利用这一特征,根据观测的气藏压力递减资料,即可确定原始储量。

对异常高压情况,应用物质平衡方法求取储量,必须进行必要的修正。在异常高压气藏的 $p/Z-G_p$ 图上,初期和晚期常常显示不同的斜率。初期较小的斜率值反映了高压下评价的气体、岩石、水压缩系数的总体影响。在中低储层压力下得到的较陡斜率反映了生产后期已大幅增加的气体压缩系数项的独特影响。Hammerlindl 认识到异常高压 p/Z 图中直线的弯曲本质,提出了两种方法,把早期 p/Z 线斜率调整到其真实值,应用物质平衡法来计算正常压力和异常高压 p/Z 外推直线斜率的比率对气体地层体积系数进行修正,必须通过对地层压缩系数的修正来获得合理的储量估算。

对于水驱气藏应用物质平衡方法,必须对水侵的影响进行必要的修正。研究表明,水侵引起 p/Z 图从斜向上直线趋势向右侧偏移。

凝析气藏物质平衡方程方法,必须考虑相态的变化影响,但由于油气之间存在质量交换,难以确定油气各自在地下的体积,因此如何建立凝析气藏物质平衡方程问题,本书将进行详细论述。

3. 产能分析方法研究

在气田(气井)的勘探开发过程中,无论是勘探井还是开发井都需要较准确地确定气井的产能,并以此为依据对气井进行合理配产和不同阶段的产量调整,以指导气田(气藏)的科学合理地开发。气井产能试井是预测气井产能、分析气井动态、了解气层和井筒特性的最常用和最重要的方法。用于描述气井产能的表达式称为气井的产能方程,产能方程主要描述气井的产量与气井井底压力关系,一般有两种形式:二项式和指数式产能方程。产能方程一般有压力、压力平方、拟压力三种表达式。压力法、压力平方和拟压力法二项式产能方程是从渗流力学方程推导出来的,充分考虑了气体湍流的影响,它对不同地层的适用性和准确度均较高,保障了资料分析的精确度;国内目前使用较多的产能方程表达式为二项式产能方程,产能评价即通过试井方法确定气井的产能方程系数,并以此计算气井的无阻流量。常用的产能评价方法很多,也很成熟,如一点法计算、回压试井法、等时试井、修正等时试井、压力降落曲线法、压力恢复曲线法等。

4. 气藏驱动类型和最终采收率研究

气藏的驱动类型分为气驱和水驱。了解气藏的驱动类型可以帮助人们预测压力变化、气藏采收率、正确布井位置等。一般可以根据以下几点分析气藏驱动类型:气藏的水文地质特征、水向气藏的推进监测、观察气藏压力变化和气藏动态分析。

常用来确定气藏采收率的方法有三种,即测定法、类比法和计算法。

影响采收率的因素是多方面的,如原始储量、气藏压力资料是否准确以及气藏枯竭的标准。驱动类型也是影响因素之一,气驱气藏的采收率普遍高于水驱气藏的采收率。

第二节 气藏动态分析在气田开发中的地位和作用

在气田开发的过程中,气藏动态分析方法一直是处于核心技术工具地位,所有气田开发工作的方案策略均出自气藏动态分析的结论。气田开发不同阶段工作的侧重点不同,采取的开发策略、原则不同,这些所采取的不同策略和开发原则是通过气藏动态分析方法的计算结果来确定。

一、气田不同开发阶段应用不同的气藏动态分析方法

气藏动态分析方法主要侧重于研究认识气藏的各种技术方法。在气藏的不同开发阶段认识研究气藏的手段不同,气藏动态分析方法的研究内容也就不同。

1. 开发准备阶段

开发准备阶段是指气田发现到探明储量上交获得批准,并编制开发方案的阶段。气藏动态分析在此阶段的主要研究任务和内容是气藏早期评价,为上交探明储量准备编制开发方案录取各类资料,包括气藏地质资料、流体性质、气藏试气、试采等资料,来对气藏进行早期评价,以初步确定气田的储量、规模、气井的产能等,初步计算气田的探明储量,上报相关上级部门。探明储量批准后,准备对气田进行开发,制订气藏开发方案。在此阶段,气藏动态分析的主要目标是制订开发方案,达到在一定的经济、技术、环境条件下,获得气田开发的最佳效益。它的具体任务是:进行气藏描述,建立气藏三维地质模型,弄清气藏中的流体(天然气、水)在地面及气藏条件下的组分构成、特征参数、化学物理特征、估算气藏的含气面积和储量,以进行气井试井设计和解释以及评价气井产能、预测开采速度、建立气藏数学模型并进行数值模拟研究,划分开发层系、选择开采方式,设计开发井网,计算预测、选择合理的采气速度,设计选择优化开发方案。

2. 气田建设阶段

气田建设阶段是指气藏开发方案获得批准,进行气田产能建设,到气田建设全部完成达到方案设计要求,进入气田全面生产之前的阶段。由于开发准备阶段对气藏的认识仍存在较多的不确定性,为进一步加深认识和回避风险,加之考虑下游用户需求量的限制,对气田总体开发方案的建设实施,一般采用整体部署、分步实施的策略。因此,在此阶段气藏动态分析工作具有承上启下的作用。在气井相继投产初期所表现出的动态特征对气藏的认识具有验证、加深的作用,此阶段要及时跟踪各气井的动态特征,及时提出调整意见,优化开发方案的部署和调整。在气田开发建设过程中,气藏动态分析的研究内容是保证气藏开发方案的实施,并及时跟踪,进一步加深对气藏的认识,再根据相应的变化做出开发方案分步实施的相应调整方案。

3. 气田生产阶段

从气田产能建设全部完成,气田全面投产,到气田商业生产期结束,气藏动态分析的主要工作内容是管理好气田,分析掌握气井、气田的开发生产动态,监测并分析气藏动态变化,预测其开发效果,并提出气田开发调整的相应措施,使气田开发所采取的开采策略能够达到延长气田商业生产期的最终目标。

4. 气田废弃阶段

气田废弃阶段是指气田开发进入后期,因不具有经济效益而废弃的阶段。但要计算气井的废弃压力、气田开发的经济效益,确定最终的废弃策略。

二、气藏动态分析方法在不同开发阶段的工作任务及侧重点不同

气藏数值模拟技术是气藏分析方法中的核心技术之一,在气田开发管理的各个阶段都起着越来越重要的作用。在气田开发准备阶段,气藏数值模拟用于辅助制订气藏的开发方案,此时对气藏的描述通常很有限,因此对气藏开发方案的优化也是极其有限的。然而,通过对气藏进行数值模拟,可以获得一些很有用的开发信息,减少对一些不确定因素的分析确定工作。在此阶段,气藏评价结果中对气藏描述和岩石—流体的数据还存在着许多不确定因素。应用气藏数值模拟可以分析这些不确定因素的敏感性。当某些因素对气藏开发效果不敏感时,可以暂时忽略,而对那些对气藏开发十分敏感的因素必须要花大力气去获取,使资料录取等工作抓住重点,录取那些对计算结果最有影响的数据。

在开发初期阶段,因为有不不确定因素的存在,使得模拟研究处于初级阶段。在不断获得新的数据后,模拟会周期性更新。这就意味着从第一次模拟而导出的初始开发计划要有足够的弹性以适应将来随着资料的不断获得而做出的变化。对那些气藏描述及岩石、流体性质已经比较明确的情况,就可以用数值模拟来规划井位、布井密度等,通过比较布井方案的开发效果来选择最佳开发方案。在气田开发生产一段时间后,对气藏的数值模拟模型就要从定性改进到定量的水平。例如,对于特定的气藏模拟结果不一定符合实际的生产情况,因为当时还存在着许多未知数。气藏生产一段时间后,可以确定原来编制的开发方案是否合理,要用合理的数值模拟模型来预测气田的生产动态。首先要完善数值模拟模型,使其与实际生产动态相拟合,与已有的生产数据相拟合,通过在一定范围内调整输入数据进行试差法逼近计算,直到数值模拟模型对气藏历史的模拟与实际生产历史拟合到满意为止。一旦拟合满意后,此气藏数值模拟模型就用来预测和优化未来气藏的开发动态,指导气田的开发合理进行。在气田废弃阶段,数值模拟技术可以通过模拟进行不同的开发调整和挖潜措施的有效性来给出最终确定是否废弃气田的建议。

综上所述,在气田开发的每一阶段,气藏动态分析一直处于核心技术地位。气田的开发策略、调整措施等均需要对气藏进行细致的气藏动态分析。气藏动态分析方法在气田的不同阶段工作的侧重点不同,在指导气藏开发时要根据不同阶段的开发目标进行合理的选择使用。

第二章 气藏流体基本特征

气藏中存在的主要流体是天然气和水。天然气是从油气田开采的可燃气体,它在各种压力和温度下的物性参数(如密度、压缩系数、粘度等),是气藏动态分析和采气工艺所必需的基础数据。本章着重介绍气藏流体物性参数的定义及其计算方法等内容。

第一节 天然气高压物性参数计算

天然气在各种压力和温度下的物性参数在可能的情况下,应当直接取气样通过常规实验方法或高压物性实验方法进行测定。然而在实际气藏开发和生产中不易获得更多的实测值(特别是对新开发的气藏),因而采用以最具代表性的参数来计算天然气的高压物性参数显得十分必要。

一、天然气的组成及物理化学性质

1. 天然气的组成

天然气是以石蜡族低分子饱和烃为主的烃类气体和少量非烃类气体组成的混合气。对于一个油、气田来说,其所产的天然气含有哪些组分,每一组分又各占多少,这些对天然气的物性和品质影响很大。

在组成天然气的组分中,甲烷(CH_4)占绝大部分,乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})和戊烷(C_5H_{12})含量不多。天然气中还含有少量的非烃类气体,如硫化氢(H_2S)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、氮(N_2)、氧(O_2)、氢(H_2)和水(H_2O)等。天然气中有时也含有微量的稀有气体,如氦(He)和氩(Ar)等。

在标准状态下,甲烷和乙烷是气体。丙烷、正丁烷($n\text{-C}_4\text{H}_{10}$)和异丁烷($i\text{-C}_4\text{H}_{10}$)也是气体,但经压缩冷凝后极易液化,家用液化气(LPG)就是这类组分。戊烷和戊烷以上(常用符号 C_5^+ 表示)的轻质油称为天然汽油(NG)。在天然气的烃类气体中,除甲烷外,通称天然气液烃(NGL),因为通过一定的液化装置都能使它们液化。

各种组分在天然气中所占数量比例,称为天然气的组成。不同类型的油、气田中,天然气的组成差异很大,表2-1-1列举了不同类型的油气田中天然气的组分、相对分子质量及相对密度;不同的气田或裂缝系统,天然气的组成也不同(表2-1-2)。

表2-1-1 有代表性的油、气田天然气组成(体积分数)

组 分	干气, %	凝析气, %	油田伴生气, %
C_1	96.00	75.00	27.52
C_2	2.00	7.00	16.34
C_3	0.60	4.50	29.18
C_4	0.30	3.00	22.55
C_5	0.20	2.00	3.9

续表

组 分	干气,%	凝析气,%	油田伴生气,%
C ₆	0.10	2.50	0.47
C ₇ ⁺	0.80	6.00	0.04
合计	100.00	100.00	100.00
	M _g = 17.584 γ _g = 0.607	M _g = 27.472 γ _g = 0.948	M _g = 38.568 γ _g = 1.331

注:1. 组分中下角标 1~7 表示碳原子数,即甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷、庚烷。

2. M_g 表示相对分子质量;γ_g 表示相对密度。

表 2-1-2 四川部分气田天然气组成(质量分数)

气田	天然气组成,%								
	甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	二氧化碳 + 硫化氢	不饱和烃	一氧化碳	氢	氮
自流井	95.94	0.66	0.24		0.67	0.07	0.05	0.02	0.67
邓关井	97.55	0.9	0.22	0.07	0.23	0.13	0.1	0.09	0.52
圣灯山	95.43	0.99	0.4		1.53	0.13	0.18	0.02	1.53
黄家场	96.71	0.78	0.17		1.04	0.03	0.02	0.18	0.95
阳高寺	95.54	1.41	0.37		0.4	0.12	0.18	0.15	1.76
纳 溪	96.62	1.34	0.47		0.42	0.11	0.05	0.04	1.14
长桓坝	97.61	1.15	0.39		0.24	0.11	0.14	0.06	0.41
黄瓜山	94.85	1.17	0.21	0.13	2.26		0.1	0.73	0.25
龙洞坪	92.57	1.16	0.55	0.37	0.06	0.05	0.25	0.12	4.38
石油沟	94.74	2.59	1.01		0.31	0.03	0.02		0.89
东 溪	95.59	1.71			1.91	0.23			0.51
卧龙河	90.29	0.48	0.15	0.15	3.76			0.06	0.48

天然气的组成不仅可作为气田分类的依据之一,也是选择地面天然气处理方法的重要依据。

天然气组成有质量组成、体积组成和摩尔组成三种表示方法。每种组成的数值可用分数或小数表示,也可用百分数表示。

1) 质量组成

如天然气由 k 种气体组成,则总质量 m 等于各组分质量 $m_1, m_2, \dots, m_k$ 之总和,即:

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_k = \sum_{i=1}^k m_i$$

其中, i 组分的质量 m_i 与总质量 m 之比值即为该组分的质量分数,用 w_i 表示,即:

$$w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \tag{2-1-1}$$

显然, $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ 。

2) 体积组成

如天然气由 k 种气体组成,在标准状态下,气体的总体积 V 等于各组分的分体积 $V_1, V_2, \dots, V_k$ 之总和,即:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_k = \sum_{i=1}^k V_i$$

其中,在标准状态下, i 组分的体积 V_i 与总体积 V 之比值即为该组分的体积分数,用 y_i 表示,即:

$$y_i = \frac{V_i}{V} = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^k V_i} \quad (2-1-2)$$

显然, $\sum_{i=1}^k y_i = 1$ 。

3) 摩尔组成

如天然气由 k 种气体组成,则总摩尔数 n 等于各组分的摩尔数 $n_1, n_2, \dots, n_k$ 之总和,即:

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k = \sum_{i=1}^k n_i$$

其中, i 组分的摩尔数 n_i 与总摩尔数 n 之比值,即为该组分的摩尔分数,用 y_i 表示,即:

$$y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (2-1-3)$$

显然, $\sum_{i=1}^k y_i = 1$ 。

对于理想气体,体积分数等于摩尔分数,所以(2-1-2)式和(2-1-3)式都用同一符号 y_i 表示。但在高压下,体积分数与摩尔分数就不是同一数值。

质量组成与体积组成(或摩尔组成)之间可以互相换算,换算时所用的基本公式为:

$$m_i = n_i M_i \text{ 或 } n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad (2-1-4)$$

式中: M_i —— i 组分的相对分子质量,其值可查表 2-1-6。

4) 天然气的相对分子质量

天然气是多种气体组成的混合气,其组分和组成无定值。天然气也没有一个唯一公认的分式,不能像有分子式的纯气体可以从分子式计算出一个恒定的相对分子质量。但是,工程上为了计算上的需要,人为地将标准状态下 1 摩尔体积天然气的质量,定义为天然气的“视相对分子质量”或“平均相对分子质量”。根据 Key 混合规则,用公式表示为:

$$M_g = \sum y_i M_i \quad (2-1-5)$$

式中: M_g ——天然气的视相对分子质量;

y_i ——组分 i 的摩尔组成,小数。

显然,天然气的视相对分子质量取决于天然气的组成。各气田的天然气组成不同,视相对分子质量也就不同。一般干气田的天然气视相对分子质量为 16.82 ~ 17.98。

众所周知,干燥空气也是由氧、氮等气体组成的混合气,其通用的视相对分子质量也是由 (2-1-5) 式确定的,公认值为 28.97,工程上常取 29。

在后面提到的天然气和空气的视相对分子质量不再冠以“视”字,简称为相对分子质量。但是应清楚理解天然气和空气的相对分子质量毕竟是人们设想的概念。

5) 天然气的密度

天然气的密度定义为单位体积天然气的质量。在理想状态下,可以用 (2-1-6) 式表示为:

$$\rho_g = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (2-1-6)$$

式中: ρ_g ——天然气的密度, kg/m^3 ;

m ——天然气的质量, kg ;

V ——天然气的体积, m^3 ;

p ——绝对压力, MPa ;

T ——热力学温度, K ;

V ——天然气的体积, m^3 ;

M ——天然气的相对分子质量, kg/kmol ;

R ——气体常数, $0.008314 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

对于混合气体,用混合气体的视相对分子质量 M_g 代替单组分气体的相对分子质量 M ,得到混合气体的密度方程为:

$$\rho_g = \frac{pM_g}{RT} \quad (2-1-7)$$

6) 天然气的相对密度

天然气的相对密度定义:在相同温度、压力下,天然气的密度与空气密度之比。它是一个无量纲,常用符号 γ_g 表示,则:

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{air}}} \quad (2-1-8)$$

式中: γ_g ——天然气的相对密度;

ρ_g ——天然气的密度, kg/m^3 ;

ρ_{air} ——干燥空气的密度, kg/m^3 。

如将天然气和干燥空气视为理想气体,天然气的相对密度还可表示为:

$$\gamma_g = \frac{M_g}{M_{\text{air}}} = \frac{M_g}{28.97} \approx \frac{M_g}{29} \quad (2-1-9)$$

式中: M_{air} ——干燥空气的相对分子质量。

显然,天然气的相对分子质量与相对密度成正比。

在天然气的常见组分中,若气体全部由 CH_4 组成,则气体的相对密度最小,为 0.55;若气