

姚 军 王子胜 著

缝洞型碳酸盐岩油藏 试井解释理论与方法

Theory and Method for Well Test Interpretation
in Fractured-vuggy Carbonate Reservoirs

中国石油大学出版社

姚 军 王子胜 著

缝洞型碳酸盐岩油藏 试井解释理论与方法

Theory and Method for Well Test Interpretation
in Fractured-vuggy Carbonate Reservoirs



中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法/姚军,王子胜著. —东营:中国石油大学出版社,2008.1
ISBN 978-7-5636-2544-4

I. 缝… II. ①姚…②王… III. 碳酸岩油气田—试井—研究 IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 019734 号

书 名: 缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法
作 者: 姚 军 王子胜

责任编辑: 袁超红 高 颖
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
排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心
印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791,8392563)
开 本: 185×260 印张:16.25 字数:414 千字
版 次: 2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
定 价: 52.00 元



姚军教授所著的《缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法》将要由中国石油大学出版社出版了。该书是作者在碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法领域多年积累的研究成果的基础上总结提炼而成的,集中体现了该领域理论与方法研究的现状、前沿和发展趋势,具有鲜明的时代特色。同时该书又非常注重理论的基础性、系统性和完整性,为读者真正理解试井解释理论与方法提供了重要基础。

全书内容共分八章。第一章系统地介绍了试井解释的一些基本概念、基本理论和基本方法,详细阐述了一些公式和模型的建立过程,内容全面、翔实,这是该书的一个特色。第二章讲述了双重介质油藏试井解释的一些基本理论与方法,并对最新发展起来的双重介质流线试井解释理论进行了介绍。第三章至第五章在分析缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间、储层特征、渗流机理和岩石力学性质的基础上,创造性地建立了多种三重介质、压敏介质和复合介质等缝洞型碳酸盐岩油藏的试井解释模型,并采用解析和数值方法进行了求解。第六章在分析以上模型的基础上,形成了负表皮、窜流阶段判断、压敏油藏试井解释方法以及非线性模型中直线外边界的处理方法。第七章针对碳酸盐岩油藏中有限底水的存在,形成了底水油藏试井解释方法。第八章介绍了以上理论与方法及相应的软件在各大油田的应用,并进行了实例分析。

该书的特色可以归纳为以下几个方面:

1. 内容新颖,具有前沿性和针对性。该书是在作者近年来的科研成果基础上总结提炼而成的,内容新颖。针对国内近年来投入开发的缝洞型碳酸盐岩油藏,形成了适合这类油藏的试井解释理论与方法。有关成果曾于 2005 年获中国石油和化学工业协会科技进步二等奖。

2. 基础性、系统性和完整性很强。该书的第一章和第二章系统地介绍了试井解释的一些基本概念、理论和方法,使该书的理论系统比较完整,同时也为读者深刻理解该书的内容奠定了基础。

3. 理论与方法的实用性。理论结合实际是对应用基础研究工作的基本要求。理论研究成果必须放到实际中去检验,故要求所形成的理论和方法具有较强的实用性。该书很好地体现了这一要求,形成了能够解决矿场生产难题的方法和技术。

4. 内容的丰富性。从试井解释的基础理论与方法,到针对性很强的缝洞型碳酸盐岩油藏的试井解释理论与方法,再到试井解释软件的研制和矿场应用,该书为读者提供了丰富的信息和知识。

姚军教授的专著在具有很强的针对性的同时,兼顾了试井解释理论与方法的基础性与完

整性,既可以作为各院校教学的参考书,也可以作为现场工作人员的工具书,为他们提供研究问题和解决问题的思路和方法。

随着我国海相碳酸盐岩油藏勘探开发工作的深入和扩展,姚军教授的专著将会在我国油田开发中发挥越来越大的作用,为我国石油工业的宏伟发展作出贡献。

郭书

2007年11月11日
北 京

序 2

随着我国国民经济的快速发展,对能源尤其是石油的需求量越来越大,许多非常规油藏开始投入开发,缝洞型碳酸盐岩油藏就是其中非常特殊的一类。这类油藏由于多期构造、岩溶等作用,形成孔、缝、洞交错叠合分布的复杂油气储集空间,使得其渗流机理、压力动态等都变得异常复杂,目前成熟的针对砂岩油藏和裂缝性碳酸盐岩油藏的试井解释理论与方法已无法满足矿场实测资料解释的需要。

由姚军教授所著的《缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法》一书从基本的试井解释理论与方法出发,结合缝洞型碳酸盐岩油藏中孔、缝、洞的渗流机理、岩石性质以及油藏地质特征等,建立了溶洞-井筒连通、缝洞-井筒连通、孔缝洞-井筒连通、压敏和复合介质以及有限底水体体积油藏等多种试井解释物理模型和数学模型;在对数学模型进行分析的基础上,形成了以Laplace变换、数值求解和隐式差分格式数值求解为基础的数学模型求解方法;针对该类油藏中油井的表皮系数为负值且绝对值较大,导致在压力计算中早期数据出现振荡现象的问题,通过等效井径方法,并对其他有关参数进行相应的处理,有效地解决了该问题;通过对压力动态的分析,形成了一阶压力导数“凹陷”类型判断和压敏油藏压力试井解释方法;在对压敏油藏非线性试井数学模型进行研究的基础上,解决了该类油藏中线性外边界的问题;基于软件工程的思想,研制开发了缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释软件,在中国石化塔河油田四、六区重点区块,胜利油田的埕岛、富台油田等进行了广泛的应用,共解释 57 井次,解决了现有软件无法对一些复杂油藏测试数据进行解释的问题,且解释结果可靠,更加符合这类特殊油藏的地质和储层特征。

塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏的投入开发,揭开了我国此类油藏开发的序幕。对该类油藏渗流机理和试井解释理论与方法进行研究,将为其合理、高效开发提供坚实的理论基础和决策依据。

试井解释是评价地层和测试井参数、动态特征的有效手段。我相信,姚军教授所著《缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法》一书将会在今后我国缝洞型碳酸盐岩油藏的开发中大有用武之地,发挥越来越重要的作用。

王
召平

— 前 言 —

目前,在世界已探明储量中碳酸盐岩油气藏储量占 50%,产量占 60%以上。我国海相碳酸盐岩油气资源量大于 300×10^8 t 油当量,石油资源量约为 150×10^8 t,但探明率仅为 8%。缝洞型碳酸盐岩油藏占探明储量的 $2/3$,是增储上产的主要阵地。缝洞型碳酸盐岩油藏经历了多期构造运动、多期岩溶叠加改造、多期成藏等过程,形成了与古风化壳有关的缝洞型碳酸盐岩储层,一般具有储集空间类型多样化、储集体连通性差、流体流动状态及油水关系复杂等特点。由于对缝洞体发育规律和油藏流体流动特征的认识程度低,导致此类油藏钻井成功率低、采收率低、产量递减快。

油气田开发动态监测解释水平在一定程度上决定了科学、高效开采的程度,作为油藏工程师“眼睛”的试井解释方法是油气藏动态监测的重要方法。然而,由于储层不仅发育有溶蚀孔隙、微裂缝和大裂缝,还发育有大型的溶蚀孔洞,加上埋藏深和处于高温高压下,岩石具有明显的压敏效应,流动规律异常复杂,因此只考虑裂缝和基岩孔隙系统的双重介质试井解释方法的适用性非常差,甚至不适用。这样就有必要基于缝洞型碳酸盐岩油藏的流动模式和孔缝洞发育特点,发展一套适合于缝洞型碳酸盐岩油藏的试井解释方法。

本书是作者近 10 年来在该领域系统研究的成果,内容包括试井解释模型建立、求解理论与方法、压力特征分析、流动形态识别以及自动拟合方法等。全书共分八章。第一章简要介绍了试井解释的基础理论、基本概念和基本方法,为后续试井解释方法的开展作了理论上的铺垫;第二章介绍了基于双重介质假设的传统碳酸盐岩裂缝性油藏的试井解释方法,以及新的研究成果——碳酸盐岩裂缝性油藏的流线数值试井解释方法;第三章介绍了缝洞型碳酸盐岩油藏几个典型的试井解释模型及其求解方法,阐述了其流动形态及其在压力导数曲线上的特征;第四章介绍了考虑压力敏感效应的单孔隙介质、双重孔隙介质和缝洞孔隙介质油藏的试井解释模型、求解方法以及在压力曲线和压力导数曲线上的特征;第五章介绍了单孔隙介质、双重孔隙介质以及缝洞型孔隙介质的复合油藏试井解释模型、求解理论与方法,以及压力和压力导数曲线的响应特征;第六章重点介绍了对缝洞型碳酸盐岩油藏的内外边界条件的处理方法;第七章系统介绍了底水油藏试井解释模型、数值求解方法及其压力特征;第八章介绍了基于上述理论编制的缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释软件及其在油田的应用。

本书各章节的编写工作如下:第一章、第二章、第三章及第六章由姚军编写,第四章、第五章、第七章及第八章由王子胜编写。姚军负责全书的统稿工作。

在本书出版之际,向中国石化股份有限公司油田勘探开发事业部、科技开发部和西北分公

司等单位的领导及专家的大力扶持表示感谢。每次项目汇报和学术交流他们都给予了很好的指导和建议,使得书中的研究成果得以提升,并且为书中理论和方法的应用提供了大力支持。

本书的出版得到了中国石油大学(华东)“211 工程”建设经费的资助,在此表示感谢。

限于作者水平,本书定有许多不完善和欠妥之处,敬请各位专家批评指正。

作 者

2007 年 11 月

目 录

第一章 试井基本理论与解释方法	1
第一节 试井分析概述	1
第二节 试井分析基本概念	3
第三节 常规试井分析方法	14
第四节 压力导数曲线及其应用	22
第五节 现代试井分析方法	33
第六节 测试数据的预处理	37
第七节 变流量试井分析方法	39
第八节 碳酸盐岩油藏渗流基本方程	42
第九节 试井自动拟合解释原理与方法	49
本章小结	64
第二章 碳酸盐岩裂缝性油藏试井解释理论与方法	65
第一节 双重介质油藏拟稳态窜流试井解释方法	65
第二节 双重介质油藏不稳态窜流试井解释模型及其求解	77
第三节 双重孔隙介质流线试井解释方法	88
本章小结	93
第三章 缝洞型碳酸盐岩油藏的试井解释方法	94
第一节 溶洞-井筒连通模型	94
第二节 裂缝和溶洞-井筒连通模型	106
第三节 裂缝、溶洞和基岩-井筒连通模型	117
第四节 非达西渗流试井解释模型	121
本章小结	130
第四章 变形介质油藏试井解释模型及其求解方法	131
第一节 单孔隙压敏油藏试井解释模型	132
第二节 双重孔隙压敏油藏试井解释模型	134
第三节 三重变形介质试井解释模型	141
本章小结	156
第五章 复合油藏试井解释模型及其求解方法	157
第一节 单孔隙介质复合油藏试井解释模型	157
第二节 双重孔隙介质复合油藏试井解释模型	161

第三节 三重介质复合油藏试井解释模型	165
本章小结	172
第六章 边界条件的处理方法	173
第一节 考虑井筒储存和污染效应时的压力求解方法	173
第二节 外边界对压力响应的影响分析	177
第三节 非线性渗流有界问题的求解方法研究	182
第四节 压敏油藏试井解释方法	189
本章小结	192
第七章 底水油藏试井解释模型及求解方法	193
第一节 理论模型的建立	193
第二节 求解方法及参数处理方法	194
第三节 具有底水的均质油藏	196
第四节 具有底水的双重孔隙介质油藏	198
第五节 具有底水的双重渗透介质油藏	205
第六节 具有底水的油藏模型求解方法	208
第七节 底水油藏参数敏感性分析	210
本章小结	216
第八章 碳酸盐岩油藏试井解释软件及其应用	217
第一节 碳酸盐岩油藏试井解释软件介绍	217
第二节 碳酸盐岩油藏试井解释软件的应用	225
本章小结	246
参考文献	247

第一章 试井基本理论与解释方法

第一节 试井分析概述

一、试井及试井解释方法

试井是为获取井或地层的参数将压力计下入井下测量压力和/或流量随时间的变化,并进行测试资料分析处理的总过程的简称。试井包括矿场测试和资料分析处理两部分。矿场测试涉及测试仪器和测试工艺,属于生产操作的内容,本书只进行简单的介绍;测试资料的分析处理涉及油气渗流理论及其应用,形成了一套实用的试井解释方法,这些方法具有较强的理论性,这是本书重点介绍的内容。

试井解释方法是利用渗流理论分析测试资料,评价地层或井参数的方法,是油气渗流理论在油气田开发中的实际应用。多年来,针对不同测试类型和油藏已形成了较多的、实用的试井解释方法。习惯上,将试井分析方法分为常规试井分析方法和现代试井分析方法。

二、试井的目的及分类

1. 试井的目的及用途

试井测试技术是认识油气藏,评价油气藏动态、完井效率以及措施效果的重要手段。试井测试所录取的资料是各种资料中唯一在油气藏流体流动状态下录取的资料,因而其分析结果也最能代表油气藏的动态特性。具体来说,它可解决下列问题:

- (1) 确定原始地层压力或平均压力;
- (2) 确定地下流体在地层内的流动能力,即渗透率和流动系数等;
- (3) 对油井实施增产措施后,判断增产效果,即酸化和压裂效果;
- (4) 了解油藏形状,目的是了解油藏能量范围,确定边界性质(如断层、油水边界和尖灭等)以及边界到测试井的距离;
- (5) 估算油藏单井控制储量。

试井解释成果主要用于:

- (1) 油藏评价与描述。

流动系数(Kh/μ)是描述地下流体流动能力大小的重要参数,它是油田开发方案设计和油田开发调整的重要参数,如可用于确定油井产能、井距和井数等。

油藏静压或油藏平均压力是表征油藏潜能的重要参数,在油气田开发的动态预测中起主要作用。

油藏形状及边界特性可用于估算油藏的储量及油藏与外来能量的关系。

(2) 油藏管理。

在油气田开发过程中必须监测油藏动态和油井条件变化,以准确预测未来油藏的动态,通过监测油藏和油井的动态,为油井的生产管理(如修井、实施措施等)提供决策依据。在一些情况下,还可用于监测流体在油藏中的流动,确定前缘的位置,评价油田开发的效果等。

2. 试井的分类

根据测试目的及要求的不同,可采用不同的试井测试方法。目前油气田开发过程中主要采用的试井类型有:

1) 压力降落试井(drawdown test)

对于新井或关井时间较长,地层中压力分布已稳定的油井,以定产量进行生产,井底压力不断下降,这时对油井进行的测试称为压力降落试井,简称压降试井。其流量和压力随时间的变化如图 1.1.1 所示。

很多的试井分析方法都是在压力降落试井条件下推导而得到的。然而,在实际油田开发过程中很难满足压力降落测试的条件。这主要是因为:

- (1) 油井产量很难维持恒定;
- (2) 开井生产前很难维持地层压力均匀分布。

2) 压力恢复试井(buildup test)

油井生产一段时间后突然关井,此时进行的压力测试称为压力恢复试井,简称压恢。其流量和压力随时间的变化如图 1.1.2 所示。

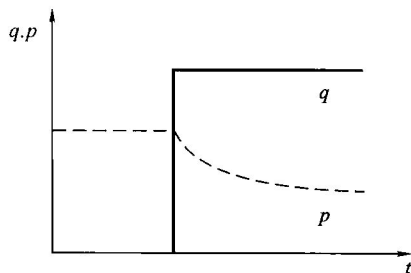


图 1.1.1 压力降落试井中流量与压力变化示意图

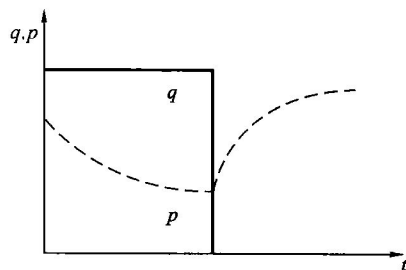


图 1.1.2 压力恢复试井中流量与压力变化示意图

压力恢复测试的优点是容易实现常流量的条件(流量为 0),缺点是:

- (1) 很难实现关井前定产量生产;
- (2) 关井测试时影响油田产量。

3) 注入测试(injectivity test)

注入井的注入测试等价于油井的压力降落测试。所谓注入测试,是指对注入井在注入过程中进行的测试。此时井底压力随时间是逐渐增加的。注入流量很容易维持恒定,但其分析比较困难。其注入量与压力的变化关系如图 1.1.3 所示。

4) 注水井压力降落测试(falloff test)

所谓注水井压力降落测试,是指对注水井关井停止注水所进行的压力测试。此时井底压力随时间而下降。概念上,注水井的压力降落测试对应于油井的压力恢复测试。其注水量与压力的变化曲线如图 1.1.4 所示。

5) 干扰测试(interference test)

干扰测试属多井试井,是指给激动井一变化信号,测试观察井的井底压力变化。测试的目

的是确定两井之间地层的连通性。激动井可通过开井、关井、注入和停注等方式来施加信号。

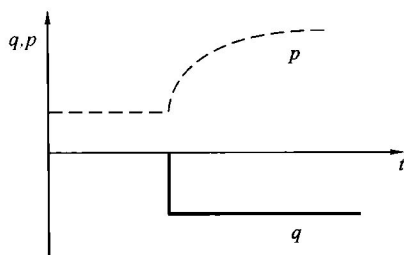


图 1.1.3 注入测试过程中
流量与压力变化示意图

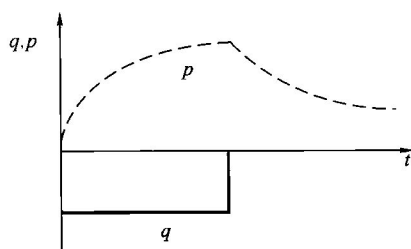


图 1.1.4 注水井压力降落测试过程中
流量与压力变化示意图

6) 钻杆测试(drill stem test, DST)

钻杆测试是利用安装在钻柱上的专用工具对新井进行的裸眼测试。测试时通过地面控制阀实现地下开井和关井,并测量其压力变化,一般要反复几次。钻杆测试通常测试时间较短。钻杆测试有时亦称中途测试,或简称 DST,其解释方法与前面几种类型的解释方法不同。钻杆测试主要用于快速确定探井的产能及流动特性。

第二节 试井分析基本概念

一、无因次变量

试井分析经常要用到无因次变量(dimensionless variables)。无因次变量的重要性在于它能简化油藏和井参数表示的试井解释模型,减少未知参数的个数。另外,它还能给出一类油藏(如均质油藏)的统一形式解,不受单位制的限制,而且表达式简单,给讨论问题带来方便。常用的无因次变量有:

1. 无因次压力 p_D (dimensionless pressure)

$$p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B} (p_i - p_w) \quad (1.2.1)$$

式中, K ——渗透率, μm^2 ;

h ——油层厚度, m ;

q ——地面流量, m^3/d ;

B ——体积系数, m^3/m^3 ;

p_i ——原始地层压力, MPa ;

p_w ——井底流动压力, MPa ;

μ ——黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

由定义式(1.2.1)可知无因次压力实际上是无因次压差,但习惯上称之为无因次压力。

2. 无因次时间 t_D (dimensionless time)

$$t_D = \frac{3.6 K t}{\phi \mu C_i r_w^2} \quad (1.2.2)$$

式中, t ——时间, h ;

ϕ ——孔隙度, 小数;

C_i ——综合压缩系数, MPa^{-1} ;

r_w ——井筒半径, m。

无因次时间也可基于油藏面积定义:

$$t_{DA} = \frac{3.6Kt}{\phi\mu C_i A} \quad (1.2.3)$$

$$A = \pi r_c^2$$

式中, t_{DA} ——基于油藏面积定义的无因次时间;

r_c ——油藏半径, m;

A ——油藏面积, m^2 。

两种无因次时间之间的关系为:

$$t_D = t_{DA} \frac{A}{r_w^2} = t_{DA} \pi \frac{r_c^2}{r_w^2} \quad (1.2.4)$$

3. 无因次半径 r_D (dimensionless radius)

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (1.2.5)$$

式中, r ——任意点到井的距离, m。

二、井筒储存效应

油井以定产量生产或油井以定产量生产一段时间后关井, 这两种情况下均会发生井筒储存效应(wellbore storage effect)。这里以开井生产为例说明井筒储存效应现象。开井初期, 地面流量主要是由于井筒内流体的卸压膨胀引起, 而地层并未向井供液, 此阶段称为纯井筒储存阶段(pure wellbore storage, PWBS)。随着时间的继续, 地下流量逐渐增加, 经过一段时间后地下流量等于地面流量, 如图 1.2.1 所示。

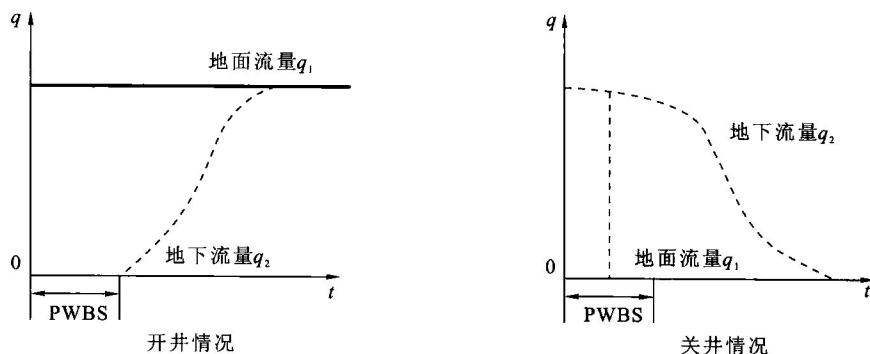


图 1.2.1 井筒储存过程中地面与地下流量的变化

井筒储存效应的大小用井筒储存系数表示, 其定义为改变单位井底压力时井筒储存或释放的流体体积。

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1.2.6)$$

式中, C ——井筒储存系数, m^3/MPa ;

ΔV ——体积变化, m^3 ;

Δp ——压差, MPa 。

现在来考虑开井过程中两种情况下的井筒储存计算方法。

1. 井筒中具有气液两相

对于抽油井或气举井,井筒中一般上部是气柱,下部是液柱,如图 1.2.2 所示。设地面流量 q 为常数,由图 1.2.2 可建立下列物质平衡关系式:

流入井筒的物质 - 流出井筒的物质 = 井筒内物质的增加

取时间单元 dt , 则有:

$$q_{sf} B \rho_{sf} \frac{dt}{24} - q B \rho_{sf} \frac{dt}{24} = \rho_{sf} dV_{wb}$$

$$q_{sf} B - q B = 24 \frac{dV_{wb}}{dt} \quad (1.2.7)$$

$$V_{wb} = A_{wb} z$$

式中, t ——时间, h;

q_{sf} ——地下流量, m^3/d ;

ρ_{sf} ——地下流体密度, kg/m^3 ;

V_{wb} ——井筒中流体体积, m^3 ;

A_{wb} ——井筒横截面积, m^2 。

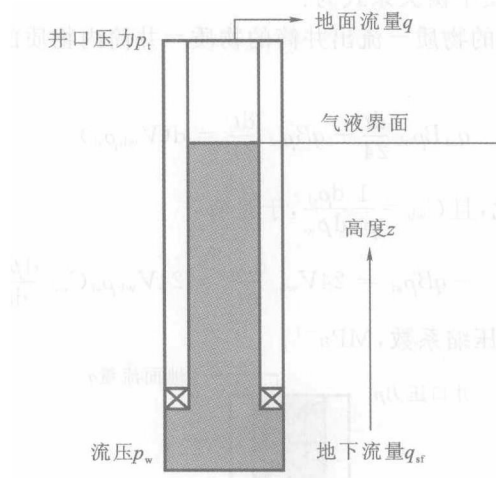


图 1.2.2 具有气液界面的井筒示意图

若假设井筒面积 A_{wb} 和流体密度 ρ 均为常数, 则式(1.2.7)可写为:

$$(q_{sf} - q) B = 24 A_{wb} \frac{dz}{dt} \quad (1.2.8)$$

在任意时刻, 地面井口压力 p_t 与井底压力 p_w 有下列关系:

$$p_w = p_t + \frac{\rho z}{100} \quad (1.2.9)$$

式中, ρ ——液体密度, kg/m^3 。

将式(1.2.9)代入式(1.2.8), 则有:

$$(q_{sf} - q) B = \frac{24 \times 100}{\rho} A_{wb} \frac{d}{dt} (p_w - p_t) \quad (1.2.10)$$

根据井筒储存系数的定义, 此时有:

$$C = \frac{100 A_{wb}}{\rho} \quad (1.2.11)$$

则式(1.2.10)变为:

$$q_{sf} = q + \frac{24C}{B} \frac{d}{dt} (p_w - p_i) \quad (1.2.12)$$

由达西定律,地下流量可写为:

$$q_{sf} = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} B\mu} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (1.2.13)$$

因此:

$$q = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} B\mu} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} - \frac{24C}{B} \frac{d}{dt} (p_w - p_i)$$

一般情况下,井口压力变化不大,即 $\frac{dp_i}{dt} = 0$, 则有:

$$q = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} B\mu} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} - \frac{24C}{B} \frac{dp_w}{dt} \quad (1.2.14)$$

上式为井筒内具有气液界面时井筒储存作为内边界条件的表达式。

2. 井筒内充满液体

如图 1.2.3 所示,其物质平衡关系式为:

流入井筒的物质 - 流出井筒的物质 = 井筒内物质的增加

dt 时间单元内有:

$$q_{sf} B \rho_{sf} \frac{dt}{24} - q B \rho_{sf} \frac{dt}{24} = d(V_{wb} \rho_{sf})$$

此时,由于 V_{wb} 不再发生变化,且 $C_{wb} = \frac{1}{\rho_{sf}} \frac{d\rho_{sf}}{dp_w}$, 于是有:

$$q_{sf} B \rho_{sf} - q B \rho_{sf} = 24 V_{wb} \frac{d\rho_{sf}}{dt} = 24 V_{wb} \rho_{sf} C_{wb} \frac{dp_w}{dt} \quad (1.2.15)$$

式中, C_{wb} —— 井筒内流体的压缩系数, MPa^{-1} 。

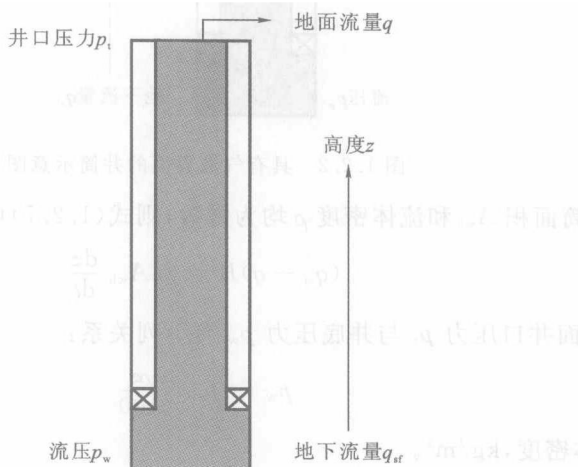


图 1.2.3 充满液体的井筒示意图

在这种情况下,根据井筒储存系数的定义,有:

$$C = V_{wb} C_{wb} \quad (1.2.16)$$

则物质平衡方程(1.2.15)变为:

$$q_{sf} = q + \frac{24C}{B} \frac{dp_w}{dt}$$

故有:

$$q = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} B\mu} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} - \frac{24C}{B} \frac{dp_w}{dt} \quad (1.2.17)$$

这就是井筒内充满液体时井筒储存作为内边界条件的表达式。由式(1.2.14)和(1.2.17)可知:两种情况下井筒储存的表达形式一样,其无因次表达形式为:

$$\left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} - C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} = -1 \quad (1.2.18)$$

式中的 $C_D = \frac{0.159C}{\phi C_1 r_w^2 h}$ 为无因次井筒储存系数。

三、表皮效应

钻井和完井过程中往往会引起井筒周围渗透率的降低,为了考虑由于渗透率降低而造成的附加压力降,Hawkins等提出了表皮效应(skin effect)的概念。表皮效应的大小用表皮系数表示。

1. 表皮系数

如图 1.2.4 所示,设污染区的渗透率为 K_s ,半径为 r_s 。在图 1.2.5 中, Δp_1 代表污染区存在时从半径 r_w 处到半径 r_s 处的压力降; Δp_2 代表污染区不存在时从半径 r_w 处到半径 r_s 处的压力降; Δp_s 代表由于污染区的存在造成的附加压力降。有下列关系:

$$\Delta p_s = \Delta p_1 - \Delta p_2 \quad (1.2.19)$$

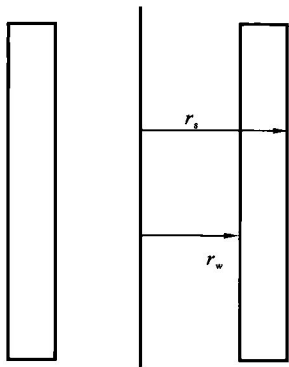


图 1.2.4 井筒污染区示意图

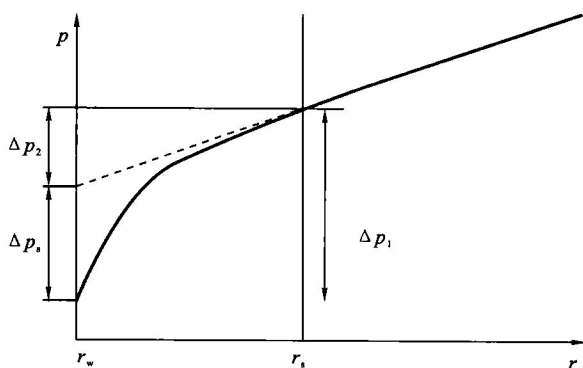


图 1.2.5 污染区的存在对井底压降的影响

由于 r_s 比较小,可认为污染区内的流动为稳定流动,则有:

$$\Delta p_1 = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{K_s h} \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right)$$

$$\Delta p_2 = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right)$$

将以上两式代入式(1.2.19),则有:

$$\Delta p_s = \frac{1.842 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \left(\frac{K}{K_s} - 1 \right) \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (1.2.20)$$

基于污染区的性质,定义表皮系数 S 为:

$$S = \left(\frac{K}{K_s} - 1 \right) \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (1.2.21)$$