



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

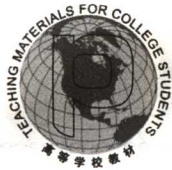
现代试井 解释原理与方法

XIAN DAI SHI JING JIE SHI YUAN LI YU FANG FA

张艳玉 姚 军 主编



中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

现代试井解释原理与方法

张艳玉 姚 军 主编

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代试井解释原理与方法/张艳玉,姚军主编. —东营:中国
石油大学出版社,2006.7

ISBN 7-5636-2263-2

I. 现... II. ①张... ②姚... III. ①试井—解释—
理论 ②试井—解释—方法 IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 079149 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 现代试井解释原理与方法

作 者: 张艳玉 姚 军

责任编辑: 李 锋(电话 0546-8392791)

封面设计: 人和视觉

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@163.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 泰安开发区成大印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546-8392563,8392791)

开 本: 180×235 印张:14.5 字数:290千字

版 次: 2006年8月第1版第1次印刷

定 价: 21.00元

内 容 简 介

试井是获取油藏参数,进行油藏动态监测的重要方法之一。本书在详细介绍试井解释基本原理、基础知识和基本概念的基础上,系统地介绍了均质、双孔介质、双渗介质等油藏各种井(包括直井、水平井、垂直裂缝井)的试井解释方法以及试井解释数学模型的建立及求解方法,并介绍了干扰试井和钻杆测试资料的解释方法。

本书内容丰富,具有较高的理论水平和实用价值,可供从事油藏地质、采油工程、油藏工程和油气田开发工程的专业人员以及大专院校相关专业的师生使用。



前 言

Foreword

油气藏试井是油藏工程分析和研究的重要手段,试井资料对于制定油气田开发方案,进行油气藏生产动态监测和预测等都有着非常重要的作用。试井分析理论与技术兴起于 20 世纪二三十年代,随着石油工业和计算机科学的发展,其相关理论与分析技术也得以不断完善和发展,特别是近 20 年来,发展尤为迅速,目前已成为正确评价油藏和进行油气田开发动态监测的必要手段。

本书从试井的基本概念和基础理论入手,在介绍试井基本原理的基础上,详细介绍了油气田开发过程中遇到的各种类型油藏、各种类型井和各种类型流体的试井分析方法。全书共分八章,第一章阐述试井分析的基本原理以及相关的基础知识;第二章以均质油藏为例,在介绍各种试井分析图版和图版拟合方法的基础上介绍现代试井解释方法;第三章介绍双重介质油藏试井解释方法;第四章介绍注水井试井解释方法;第五、第六章分别介绍压裂井和水平井试井解释方法;第七章介绍钻杆测试解释方法;第八章则对气井试井、多井试井和测试过程中的变井储问题作了简要介绍。

本书是作者结合多年从事试井分析教学和科研工作的经验并在参考了大量相关文献资料的基础上编写而成的。第二章第 2、第 3、第 4 节,第三章,第七章和第八章由张艳玉编写,第一章、第二章第 1 节、第四章、第五章和第六章由姚军编写,习题由蒋海岩编写,研究生李洪君、聂法健做了绘图、校对等工作,全书由张艳玉统编、校核、定稿。

本书的编写得到了中国石油大学(华东)教务处、中国石油大学出版社、中国石油大学(华东)石油工程学院油藏工程系的支持和帮助,也得到了试井界前辈们的指导、鼓励和支持,在此一并表示衷心的感谢。在本书的编写过程中我们参阅了大量的文献资料,在此,也向这些文献的作者们深表谢意。

由于编者的经验和水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 7 月

目 录

Contents

第一章 现代试井分析基础	1
§ 1-1 试井分析概述	1
§ 1-2 试井分析基本概念	3
§ 1-3 常规试井分析方法	16
§ 1-4 现代试井分析方法	24
§ 1-5 压力导数曲线及其应用	28
§ 1-6 测试数据的预处理	37
§ 1-7 变流量试井分析方法	40
第二章 均质油藏试井解释	44
§ 2-1 均质油藏试井解释模型	44
§ 2-2 试井解释图版及图版拟合方法	49
§ 2-3 均质油藏压降试井分析	61
§ 2-4 均质油藏压力恢复试井分析	69
第三章 双重介质油藏试井解释	80
§ 3-1 双重孔隙介质油藏的有关概念	80
§ 3-2 双重孔隙介质油藏试井解释数学模型及其解	84
§ 3-3 基岩向裂缝的流动为拟稳定流动模型	87
§ 3-4 基岩向裂缝的流动为不稳定流动模型	96
§ 3-5 双渗介质油藏试井解释	100
第四章 注水井试井分析方法	110
§ 4-1 单位流度比条件下的注水井压力降落测试	110
§ 4-2 流度比 $M \neq 1$ 活塞式水驱油条件下的注水井压力降落试井分析方法	116
§ 4-3 注水井压力降落试井的典型曲线分析方法	122
第五章 均质油藏中压裂井试井解释	130
§ 5-1 无限导流能力裂缝模型的试井方法	130
§ 5-2 有限导流能力垂直裂缝模型的试井解释	132
§ 5-3 压力井测试解释实例	137
第六章 水平井试井分析方法	142



§ 6-1	均质油藏水平井系统的试井解释模型	142
§ 6-2	水平井的常规试井分析方法	145
§ 6-3	水平井的现代试井分析方法	149
§ 6-4	水平井实例分析	151
第七章	钻杆测试解释方法	154
§ 7-1	钻杆测试原理及压力历史	154
§ 7-2	钻杆测试资料的定性解释	157
§ 7-3	钻杆测试流动期压力资料解释方法	162
§ 7-4	钻杆测试恢复期压力资料解释方法	169
第八章	其他的试井解释方法	181
§ 8-1	干扰试井解释方法	181
§ 8-2	气井试井解释方法	187
§ 8-3	变井筒储存系数试井解释方法	196
习题	202
参考文献	223



第一章 现代试井分析基础

§ 1-1 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到井下测量压力和(或)流量随时间的变化,并进行测试资料分析处理总过程的简称。试井包括矿场测试和资料分析处理两个部分。矿场测试涉及测试仪器和测试工艺,属于生产操作的内容,本书只作简单的介绍;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,是本书要重点介绍的。

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,因而分析结果也最能代表油气藏的动态特性。具体地说,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 对油井进行增产措施后,判断增产效果,即酸化和压裂效果;
- ④ 了解油藏形状,目的是为了解油藏能量范围,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、井距和井数目等。



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,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

所谓压力降落试井(Drawdown Well Testing)是指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,这时对油井的测试称之为压力降落试井,简称压降试井。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。主要原因为:

- 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

所谓压力恢复试井(Buildup Well Testing)是指油井生产一段时间后,突然关井,此时进行的压力测试称之为压力恢复试井,简称压恢试井,其流量与压力的变化如图 1-1-2 所示。

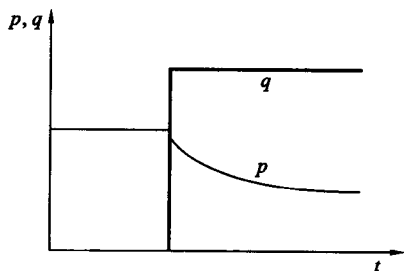


图 1-1-1 压力降落试井中流量与压力变化示意图

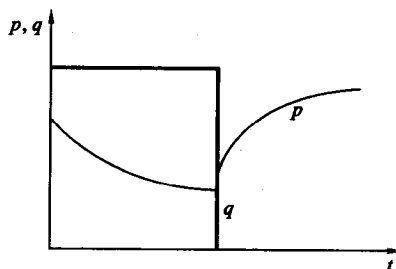


图 1-1-2 压力恢复试井中流量与压力变化示意图

压力恢复测试的优点是容易实现常流量(流量为 0)的条件,其缺点是:

- 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

注入测试 (Injectivity Test) 等价于油井的压力降落测试。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

所谓注水井压力降落测试 (Falloff Test) 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相当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。

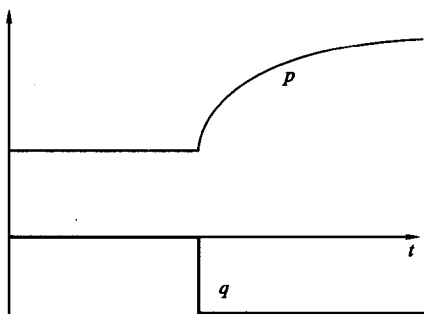


图 1-1-3 注入井注入测试过程中
流量与压力变化示意图

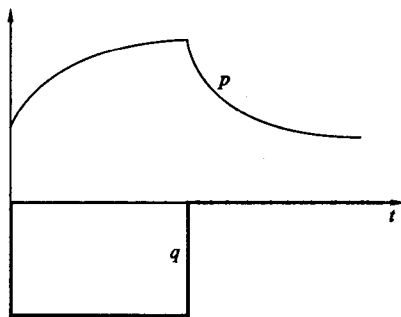


图 1-1-4 注水井压力降落测试过程中
流量与压力变化示意图

(5) 干扰试井

干扰试井 (Interference Well Testing) 属多井试井,是指给激动井 A 一变化信号,测试观察井 B 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。

(6) 钻杆测试

钻杆测试 (Drill Stem Test, DST) 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。

§ 1-2 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



在于它能简化油藏或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(比如均质油藏)的统一形式解,不受单位制的限制,而且表达式简单,给讨论问题带来很多方便。常用的无因次变量有:

1. 无因次压力(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, 标 m^3/m^3 ;

p_i ——原始地层压力, MPa ;

p_w ——井底流动压力, MPa ;

μ ——流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

从定义式(1-2-1)看出: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(Dimensionless Time)

$$t_D = \frac{3.6kt}{\phi\mu c_i r_w^2} \quad (1-2-2)$$

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:

$$t_{DA} = \frac{3.6kt}{\phi\mu c_i A} \quad (1-2-3)$$

式中: A ——油藏面积, $A = \pi r_e^2$, m^2 ;

r_e ——油藏半径, m 。

两种无因次时间定义之间的关系为:

$$t_D = t_{DA} \frac{A}{r_w^2} = t_{DA} \pi \frac{r_e^2}{r_w^2} \quad (1-2-4)$$

3. 无因次井半径(Dimensionless Radius)

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (1-2-5)$$

式中, r 为任意点到井的距离, 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,而地层中并未向井供液。随着时间的继续,地下流量逐渐增加,经过一段时间之后地面流量等于地下流量,如图 1-2-1 所示。

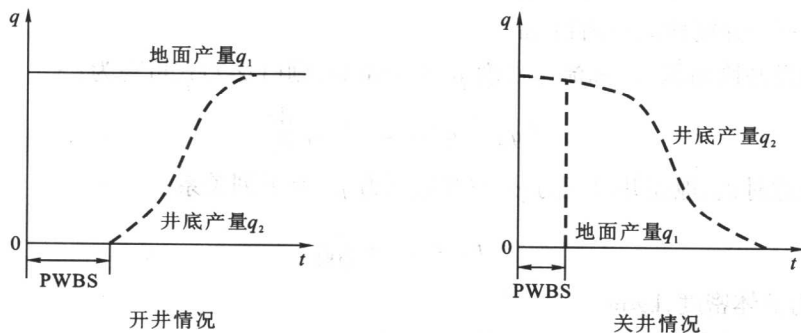


图 1-2-1 井筒储存过程中地面与地下流量的变化

PWBS: 纯井筒储存期

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 ——流体体积, m^3 ;

Δp ——压差, MPa 。

现在来考虑开井过程中两种条件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 所示可建立下列物质平衡关系式:

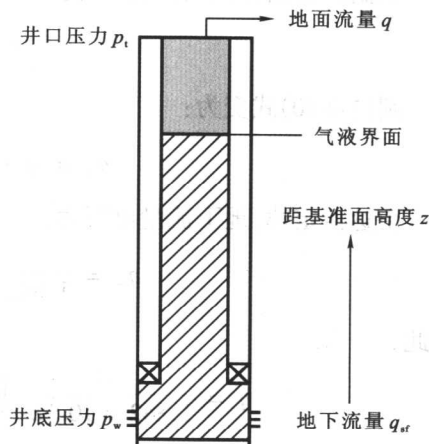


图 1-2-2 具有气液界面的井筒示意图

流入井筒的物质的量 - 流出井筒的物质的量 = 井筒内物质的增加量

取时间单元 dt , 则有:

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

$$q_{sf} B - q B = 24 \frac{dV_{wb}}{dt} \quad (1-2-7)$$



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} ——井筒体积, $V_{wb} = A_{wb}z, m^3$;

A_{wb} ——井筒横截面面积, m^2 。

若假设井筒面积 A_{wb} 和流体密度 ρ_{sf} 均为常数, 则(1-2-7)式可写为:

$$(q_{sf} - q)B = 24A_{wb} \frac{dz}{dt} \quad (1-2-8)$$

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 为液体密度, kg/m^3 。

将(1-2-9)式代入(1-2-8)式, 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:

$$C = \frac{100A_{wb}}{\rho} \quad (1-2-11)$$

则(1-2-10)式变为:

$$q_{sf} = q + \frac{24C}{B} \frac{d}{dt} (p_w - p_t) \quad (1-2-12)$$

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,

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

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

$$q = \frac{kh}{1.842 \times 10^{-3} B\mu} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} - \frac{24C}{B} \frac{dp_w}{dt} \quad (1-2-14)$$

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:

流入井筒的物质的量 - 流出井筒的物质的量 = 井筒内流体的增加量

dt 时间单元内有:

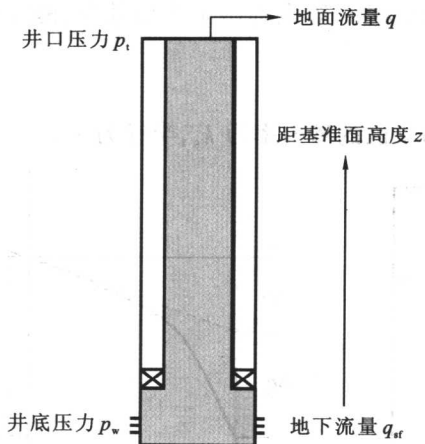


图 1-2-3 充满液体的井筒示意图

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

由于:

$$c_{wb} = \frac{1}{\rho_{sf}} \frac{d\rho_{sf}}{dp_w}$$

式中, c_{wb} 为井筒内流体的压缩系数, MPa^{-1} 。

$$q_{sf} B \rho_{sf} - q B \rho_{sf} = 24 V_{wb} \frac{d\rho_{sf}}{dt} = 24 V_{wb} \rho_{sf} c_{wb} \frac{dp_w}{dt} \quad (1-2-15)$$

因此,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(1-2-14)式和(1-2-17)式看出: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, $C_D = \frac{0.159C}{\phi c_t r_w^2 h}$ 为无因次井筒储存系数。

三、表皮效应

在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的



降低造成的附加压力降, Hawkins 等人提出了表皮效应(Skin Effect)的概念, 表皮效应的大小用表皮系数表示。

1. 表皮系数的定义

如图 1-2-4 所示, 设污染区的渗透率为 k_s , 半径为 r_s 。

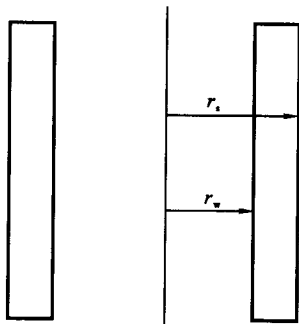


图 1-2-4 井筒污染区示意图

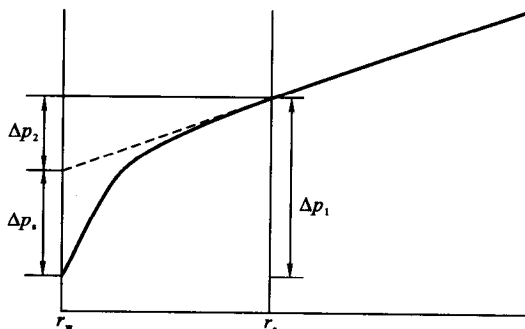


图 1-2-5 污染区的存在对井底压降的影响

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:

$$\Delta p_s = \Delta p_1 - \Delta p_2 \quad (1-2-19)$$

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(1-2-19)式, 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:

$$S = \left(\frac{k}{k_s} - 1\right) \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (1-2-21)$$

则

$$S = \frac{kh\Delta p_s}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \quad (1-2-22)$$

由(1-2-22)式看出: 表皮系数 S 实质上是无因次的附加压力降。

从(1-2-21)式可看出表皮系数 S 的物理意义, 若井被污染($k_s < k$), S 为正, 并且 k_s 与 k 相差越大, 污染区越大, 表皮系数 S 也越大。表皮系数 S 无上限, 有些新井在措施之前无产量, 此时, $k_s = 0$, $S \rightarrow \infty$ 。若井已实施措施($k_s > k$), 表皮系数 S 为负, 措



施半径越大(r_s 越大),则表皮系数 S 越小。若井没有被污染也没有进行措施($k_s = k$),此时,表皮系数 $S = 0$ 。

2. 有效井筒半径

污染效应的另一种表示方法是有效井筒半径(Effective Wellbore Radius) r_{we} 。

$$r_{we} = r_w e^{-S} \quad (1-2-23)$$

由(1-2-23)式看出:

$$S < 0, \quad r_{we} > r_w \quad \text{相当于井半径增大}$$

$$S = 0, \quad r_{we} = r_w$$

$$S > 0, \quad r_{we} < r_w \quad \text{相当于井半径减小}$$

由(1-2-22)式得:

$$\Delta p_s = \frac{1.842 \times 10^{-3} q \mu B}{kh} \cdot S \quad (1-2-24)$$

将(1-2-13)式代入(1-2-24)式则有:

$$\Delta p_s = \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} \cdot S \quad (1-2-25)$$

若用无因次参数表示,则有:

$$\Delta p_{sD} = \left(r \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \cdot S \quad (1-2-26)$$

因此,污染效应存在时无因次井底压力的表达式为:

$$p_{wD} = \left[p_D - S \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) \right]_{r_D=1} \quad (1-2-27)$$

此方程即为污染效应存在时的油井内边界条件的表达式。

3. 流动效率

有时用流动效率(Flow Efficiency)表示污染效应的大小,其定义为存在污染条件下的地层实际压力降与无污染条件下的地层理论压力降之比,用 FE 表示。

$$FE = \frac{\Delta p_{\text{实际}}}{\Delta p_{\text{理论}}} = \frac{q_{\text{实际}}}{q_{\text{理论}}} \quad (1-2-28)$$

流动效率是表示污染后流动能力大小的参数,是随时间不断变化的。

4. 部分射开引起的污染系数计算

污染效应并不总是由井筒污染造成的,在部分射开井的底层,流体不能沿整个生产层段流出,与全部射开条件相比需要克服更多的阻力才能由射孔眼流入井筒,形成部分射孔的表皮效应(图 1-2-6)。

正确估算由射孔引起的表皮系数是非常有用的,可由总的表皮系数获得地层真正的污染系数。Kuchuk 和 Kirwan(1987)提出了计算部分射开井的表皮系数的公式:

$$S_p = \frac{2}{\pi b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\pi b) \cos(n\pi b Z_D^*) K_0 \left(\frac{n\pi b}{h_D} \right) \quad (1-2-29)$$

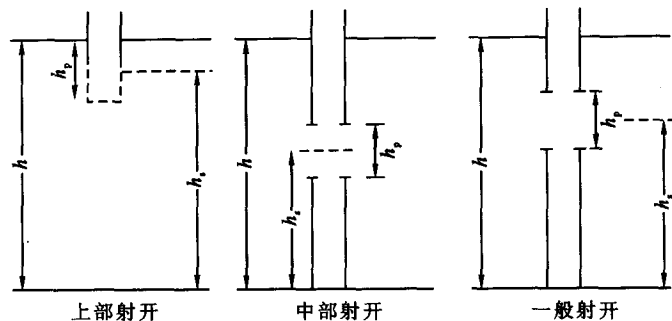


图 1-2-6 部分射开油层示意图

式中： b ——射开比， $b = \frac{h_p}{h}$ ；

h_D ——无因次厚度， $h_D = \frac{h_p}{r_w} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$ ；

k_h, k_v ——分别为水平渗透率和垂向渗透率；

K_0 ——0 阶二类修正的贝塞尔函数。

Gringarten 和 Ramey(1975)提出了有效平均压力点的计算公式：

$$Z_D^* = 0.9096 - 0.05499 \lg h_D + 0.003745 (\lg h_D)^2 \quad (1-2-30)$$

由(1-2-29)和(1-2-30)两式，可以计算部分射开井的表皮系数。也可以查图得到，如图 1-2-7 所示。

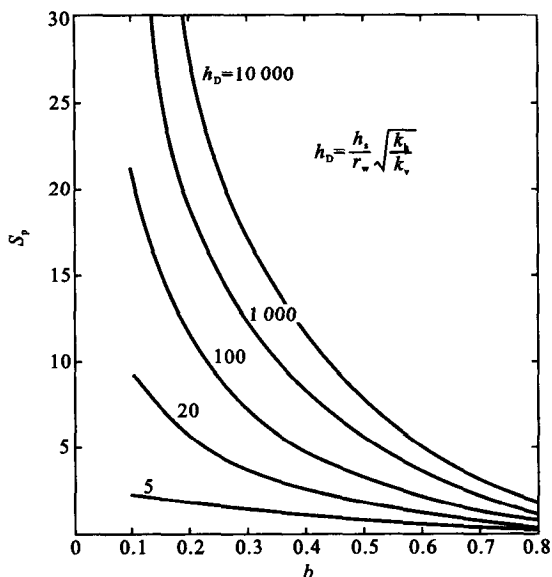


图 1-2-7 表皮系数与射开比的关系曲线