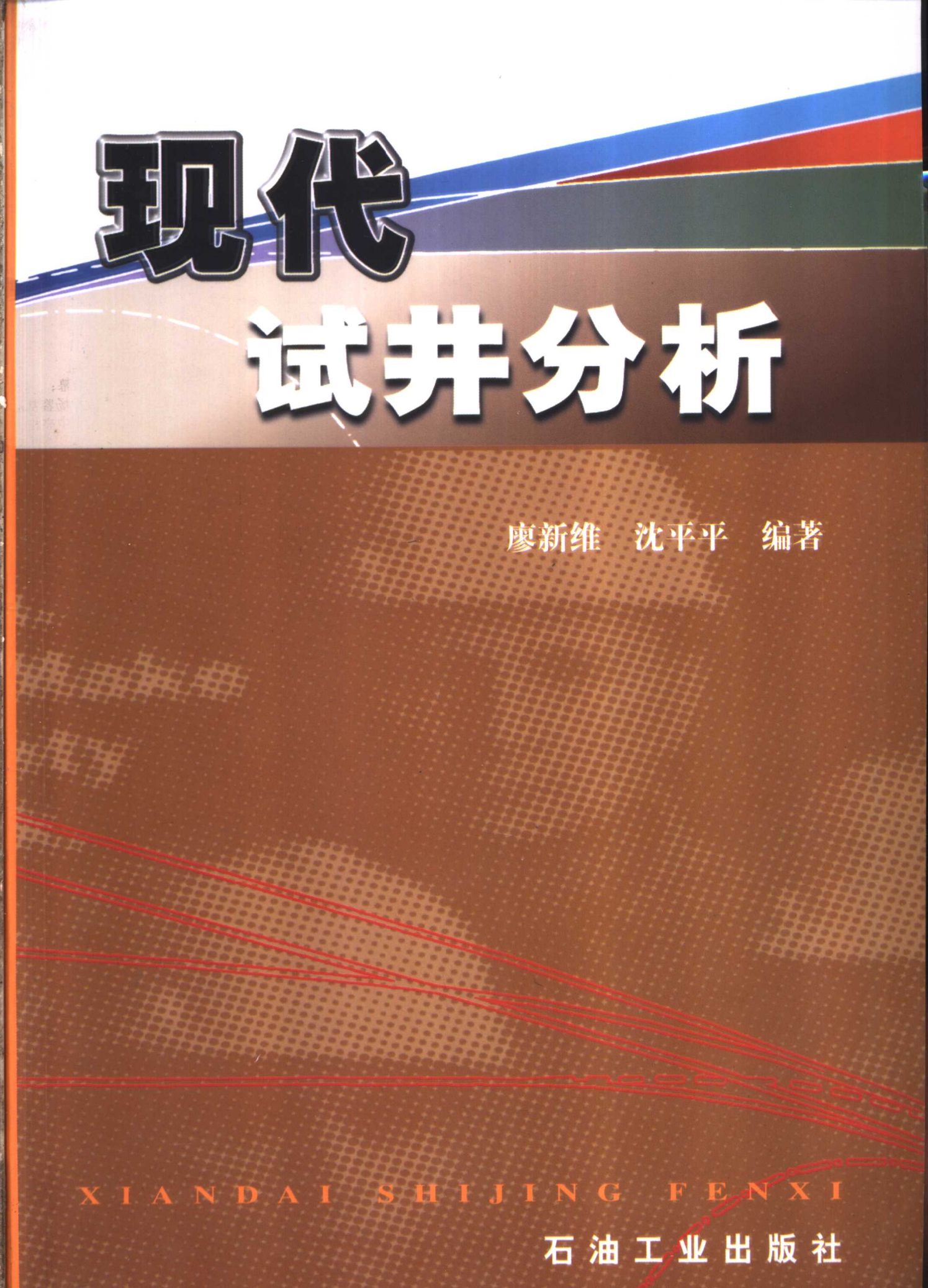




现代

试井分析

廖新维 沈平平 编著

XIANDAI SHIJING FENXI

石油工业出版社

现代试井分析

廖新维 沈平平 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书研究了多种渗流问题的不稳定试井理论和试井分析方法,其主要内容包括:不稳定试井基本概念和基本理论,试井问题的求解方法,均质、双孔、双渗、复合和分形等油藏的试井模型理论特征,直井、水平井、垂直裂缝井的试井模型理论特征,单相和多相的试井模型理论特征,直线段解释方法和曲线拟合解释方法。

本书内容丰富,具有较高的理论水平和实用价值,可供从事地质、试油试采、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有关专业的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代试井分析/廖新维、沈平平编著.

北京:石油工业出版社,2002.9

ISBN 7-5021-3956-7

I. 现…

II. ①廖…①沈…

III. 不稳定试井-分析方法

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 075095 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京乘设伟业科技排版中心排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 371 千字 印 1—2000

2002 年 9 月北京第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3956-7/TE·2851

定价:30.00 元

前 言

为了解和控制油藏信息,人们从发现油田开始就从事试井工作。试井技术经过 80 多年的历程,特别是近 20 年,伴随着渗流力学的发展,得到了迅猛的发展。从单井试井到多井试井,从垂直井试井到水平井、斜井和多分支井试井,从牛顿流体到非牛顿流体,从单相到多相,从达西线性渗流到非达西非线性渗流等,试井理论和实践取得了长足的进步,加上以油藏数值模拟技术为代表的计算技术的引入和测试仪器精密度的提高,试井所获得的结果和内容对科学高效地开发油气田做出了重大的贡献,使试井成为正确评价油藏与进行油田开发动态监测所必不可少的基础手段。

本书从试井的基本概念和基础理论开始,到试井问题的求解方法,再到油气田开发过程中遇到的各类试井模型的特征形态,最后到试井资料解释方法,系统严密地讲述了不稳定试井理论与方法,可为从事试井的工作人员学习和工作提供很好的参考。本书编写的数值试井理论和方法、分形油藏试井理论及压力导数特征点拟合方法等内容都是现代试井分析研究的新成果。本书的数学推导严谨、物理描述清晰,各章既相对独立,又相互有机结合,非常适合读者掌握试井理论与方法的深刻内涵。

本书是作者在多年从事教学和科研工作的基础上,以及查阅了大量有关文献的基础上写成的,本书的部分内容曾获得北京市科技进步二等奖和国家教委科技进步二等奖。本书共分十七章,其中第一章至第五章由廖新维和沈平平编写,第六章由刘立明编写,第七章至第十一章由廖新维编写,第十二章和第十三章由王晓冬编写,第十四章由刘立明编写,第十五章由王晓冬和李凡华编写,第十六章和第十七章由廖新维编写,全书由廖新维统稿,沈平平审阅定稿。在本书的编写过程中,试井界的前辈们给予了许多帮助、鼓励和支持,在此,谨向他们表示衷心的感谢,同时也向书中所引用文献的所有作者们表示感谢。

由于作者理论水平和实践经验有限,敬请专家读者多多批评指教。

作者

2002 年 7 月 1 日

目 录

第一章 试井分析基本概念与基本原理	(1)
第一节 试井分析基本概念.....	(1)
第二节 试井分析基本理论	(19)
第二章 分离变量法	(26)
第一节 分离变量法一般原理	(26)
第二节 特征函数和范数	(29)
第三节 分离变量法在求解不稳定渗流问题的应用	(40)
第三章 格林函数法	(45)
第一节 格林函数法的一般原理	(45)
第二节 格林函数的确定方法	(49)
第三节 格林函数法在求解不稳定渗流问题中的应用	(50)
第四章 拉普拉斯变换法	(53)
第一节 拉普拉斯变换的定义及其性质	(53)
第二节 拉普拉斯变换反变换方法	(57)
第三节 拉普拉斯变换法在求解不稳定渗流问题中的应用	(64)
第五章 积分变换法	(68)
第一节 积分变换法的一般原理	(68)
第二节 积分变换法在求解不稳定渗流问题中的应用	(72)
第六章 数值解法	(79)
第一节 数值解法一般原理	(79)
第二节 网格剖分	(80)
第三节 渗流方程的离散	(88)
第七章 贝塞尔函数	(97)
第一节 第一类和第二类贝塞尔函数	(97)
第二节 虚宗量第一类和第二类贝塞尔函数.....	(102)
第八章 直井均质油藏试井模型特征	(107)
第一节 无限大均质油藏试井模型特征.....	(107)
第二节 具有外边界影响的均质油藏试井模型特征.....	(111)
第三节 部分射开井均质油藏试井模型特征.....	(125)
第九章 直井双重孔隙介质油藏试井模型特征	(131)
第一节 无限大双重孔隙介质油藏试井模型特征.....	(131)
第二节 具有外边界影响的双重孔隙介质油藏试井模型特征.....	(138)
第十章 直井复合油藏试井模型特征	(150)
第一节 无限大复合油藏试井模型特征.....	(150)
第二节 具有外边界影响的复合油藏试井模型特征.....	(154)

第十一章	直井双渗透油藏试井模型特征	(167)
第十二章	存在垂直裂缝直井的均质油藏试井模型特征	(171)
第一节	无限导流垂直裂缝井试井模型特征.....	(171)
第二节	有限导流垂直裂缝井试井模型特征.....	(173)
第十三章	水平井试井模型特征	(178)
第十四章	数值试井模型特征	(185)
第一节	数值试井的产量模型.....	(185)
第二节	油水两相数值试井模型特征.....	(194)
第三节	油气两相数值试井模型特征.....	(197)
第十五章	分形油藏试井模型特征	(201)
第十六章	常规试井解释方法	(206)
第一节	压降常规试井解释方法.....	(206)
第二节	叠加分析试井解释方法.....	(212)
第三节	压力恢复常规试井解释方法.....	(215)
第十七章	现代试井解释方法	(217)
第一节	试井分析中系统分析问题.....	(217)
第二节	图版拟合解释方法.....	(218)
第三节	自动拟合解释方法.....	(219)
第四节	压力导数特征点拟合解释方法.....	(221)
第五节	模拟检验拟合解释方法.....	(224)
参考文献		(226)

第一章 试井分析基本概念与基本原理

试井是油气田勘探开发过程中了解地层特性的一种广泛使用的技术,它有广义和狭义两种不同含义。从广义上讲,试井的内容包括很广泛,从压力、温度的测量,到取高压物性样品,测量不同工作制度下的油、气、水流量,甚至探测砂面以了解地层出砂情况,测压力、温度梯度,以及研究井筒内的流动等,都可算得上试井的范畴。但是从狭义上讲,试井仅指井底压力的测量以及为了进行压力校正而进行的温度测量和为了分析压力而进行的产量测量。

本书所讨论的是狭义上的试井,即是通过改变油、气、水井的工作制度,以引起地层中压力重新分布,进而测量井底压力随时间的变化过程。试井分析就是对所测取的压力变化结合产量等资料进行分析,研究取得测试井和测试层在测试影响范围内的许多特性参数,这些参数包括测试井的完善程度、井底伤害情况、井筒储存效应的影响程度、测试层的流动系数或渗透率、地层压力、测试影响范围内的储量以及测试井离附近边界的距离(如果存在的话)和井间流通情况等等,进而对油气藏和井作出准确的描述。试井工作贯穿于油气田勘探开发整个过程,试井分析已经成为油气藏描述和正确、合理地开发油气田的一种重要的必不可少的手段和技术。

试井可分为产能试井和不稳定试井两大类,产能试井又包括稳定试井、等时试井和修正等时试井等。本书主要阐述不稳定试井的一些理论和方法。本章介绍试井分析所涉及的一些基本概念和基本原理。

第一节 试井分析基本概念

一、无量纲量

一般来说某一物理量被度量的数值大小与测量单位的选择有关系,我们称此物理量为有量纲量,如体积具有长度三次方的量纲 $[L^3]$,产量的量纲为 $[L^3T^{-1}]$,渗透率的量纲为 $[L^2]$ 等等。但也有些物理量不具有量纲,即量纲为1,如含油饱和度、原油体积系数、孔隙度、表皮系数等,这些物理量我们称之为无量纲量。如表1.1.1所示是试井理论中常用的物理量及其量纲形式。

表 1.1.1 常用物理量量纲形式表

变量名称	符 号	量 纲 形 式
压力	p	$ML^{-1}T^{-2}$
流量	q	L^3T^{-1}
粘度	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
渗透率	K	L^2
厚度	h	L
井半径	r	L
时间	t	T
压缩系数	C	$M^{-1}LT^2$
孔隙度	ϕ	1

注:M—质量;L—长度;T—时间。

要计算某一有量纲物理量往往需涉及到许多其他有量纲物理量,有时很不方便。为了一定的目的,常常把某些有量纲的物理量无量纲化,即引进新的无量纲量。一般来说,物理量的无量纲化就是这一物理量与别的一些物理量的组合,并与这一物理量成正比。物理量的无量纲量常常用下标 D 表示。

例如:

无量纲时间 t_D 与开井时间 t 或关井时间 Δt 成正比:

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2} t \quad (1.1.1)$$

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_w^2} \Delta t \quad (1.1.2)$$

油井的无量纲压力 p_D 与压差 Δp 成正比:

$$p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} \Delta p \quad (1.1.3)$$

无量纲井筒储集系数 C_D 与井筒储集系数 C 成正比:

$$C_D = \frac{C}{2\pi\phi C_t h r_w^2} \quad (1.1.4)$$

无量纲距离 r_D 与距离 r 成正比:

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (1.1.5)$$

无量纲化的方法不是唯一的。人们往往根据不同的需要,用不同的方法定义同一个无量纲量。例如在试井解释中,在不同的场合使用不同的无量纲时间,除了用井的半径定义的[见式(1.1.1)]之外,还有用供油半径 r_e ,油藏面积 A ,裂缝半长 X_f 定义的:

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t r_e^2} t \quad (1.1.6)$$

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t A} t \quad (1.1.7)$$

$$t_D = \frac{3.6K}{\phi\mu C_t X_f^2} t \quad (1.1.8)$$

引入无量纲量有许多好处,其中最大的好处是,通过引入无量纲物理量避免了用有量纲物理量计算所遇到麻烦,用无量纲量讨论问题具有更普遍的意义,讨论的结果适用于任何实际场合及单位制。譬如,某一数学模型的无量纲解,适用于这一模型后,可再由无量纲量与实际物理量之间的关系,把无量纲量换算成我们所需要的有量纲实际数值。正是因为这个原因,使得人们可根据有限的试井解释图版获得无限的试井分析结果。

获得无量纲量定义的理论基础就是 π 定理,为此,我们介绍一下 π 定理,并在此基础上说明怎样用它去产生无量纲量。

π 定理:如果某一现象中出现的 $n+1$ 个物理量 $a_1, a_2, \dots, a_n, a$ 由关系式 $a = f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 联系起来,且它的形式与所选的测量单位是无关的。又如果 $a_1, a_2, \dots, a_r$ 是物理量 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 中 r 个最大的与量纲无关的物理量, a 以及其余 $a_{r+1}, a_{r+2}, \dots, a_n$ 等 $n-r+1$ 个物理量都可由 $a_1, a_2, \dots, a_r$ 的量纲表示,则上述联系 $n+1$ 个物理量的关系可化成下列只联系 $n-r+1$ 个无量纲量 $\pi, \pi_1, \dots, \pi_{n-r}$ 的无量纲形式 $\pi = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r})$ 。其中, $\pi =$

$\frac{a}{a_1^\alpha \cdots a_r^\alpha}, \pi_1 = \frac{a_{r+1}}{a_1^\beta \cdots a_r^\beta}, \cdots, \pi_{n-r} = \frac{a_n}{a_1^\gamma \cdots a_r^\gamma}$ 为无量纲准数。

从以上定理解释可以看出,在应用 π 定理以后物理量 a 与 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 的依赖关系将变得更加明显简洁。应用 π 定理来处理一些具体问题的步骤大致可归纳为:

(1) 无遗漏地确定所有的主定物理量 $a_1, a_2, \cdots, a_n$; 与被定物理量 $b_1, b_2, \cdots, b_m$; 写出依赖关系: $b_1 = f_1(a_1, a_2, \cdots, a_n), \cdots, b_m = f_m(a_1, a_2, \cdots, a_n)$ 。

(2) 确定某一测量单位体系,并写出主定和被定物理量的量纲。

(3) 在主定物理量中选出一组最大量纲无关组,将每一个被定物理量以及余下的主定物理量和这一组最大量纲无关物理量组成无量纲形式。

(4) 应用 π 定理写出上述 m 个关系式的无量纲形式。

表 1.1.1 所列的变量至少可产生以下六组式子:

$$(1) \pi_1 = r^a q^b p^c h;$$

$$(2) \pi_2 = r^a q^b p^c t;$$

$$(3) \pi_3 = r^a q^b p^c \mu;$$

$$(4) \pi_4 = r^a q^b p^c K_r;$$

$$(5) \pi_5 = r^a q^b p^c C;$$

$$(6) \pi_6 = r^a q^b p^c K_v;$$

式子中 K_r 表示径向的渗透率, K_v 表示垂直方向的渗透率。

以上各式的主定物理量为: r, p, q 。

被定物理量为: h, t, μ, K_r, C, K_v 。

为了使以上各式子成为无量纲量,就要确定各式子中 a, b 和 c 的值。下面就 a, b 和 c 的值确定推导如下:

$$(1) \pi_1 = r^a q^b p^c h = L^{a-c+3b+1} M^c T^{-b-2c} = L^0 M^0 T^0$$

$$\text{即} \quad \begin{cases} a - c + 3b + 1 = 0 \\ c = 0 \\ -b - 2c = 0 \end{cases}$$

$$\text{所以} \quad \begin{cases} a = -1 \\ b = 0 \\ c = 0 \end{cases}$$

$$\text{因此} \quad \pi_1 = \frac{h}{r}$$

$$(2) \pi_2 = r^a q^b p^c t = L^{a-c+3b} M^c T^{-b-2c+1} = L^0 M^0 T^0$$

$$\text{即} \quad \begin{cases} a - c + 3b = 0 \\ c = 0 \\ -b - 2c + 1 = 0 \end{cases}$$

$$\text{所以} \quad \begin{cases} a = -3 \\ b = 1 \\ c = 3 \end{cases}$$

$$\text{因此} \quad \pi_2 = \frac{tq}{r^3}$$

同理可得:

$$(3) \pi_3 = \frac{q\mu}{pr^3}$$

$$(4) \pi_4 = \frac{K_r}{r^2}$$

$$(5) \pi_5 = pc$$

$$(6) \pi_6 = \frac{K_v}{r^2}$$

由 π 定理可得在试井分析中常用的无量纲量定义,如表 1.1.2 所示。

表 1.1.2 常用无量纲量定义表

无量纲量	气体	液体	流动几何形态
r_D	$\frac{r}{r_w}$	$\frac{r}{r_w}$	平面径向流
r_D	$\frac{r}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	$\frac{r}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	垂向径向流
x_D	$\frac{x}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	$\frac{x}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	线性流
z_D	$\frac{z}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	$\frac{z}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	线性流/径向流
z_{wD}	$\frac{z_w}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	$\frac{z_w}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	线性流/径向流
h_D	$\frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	$\frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	线性流/径向流
h_{fD}	$\frac{h_f}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	$\frac{h_f}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$	线性流/径向流
t_D	$\frac{3.6Kt}{\phi\mu Cr_w^2}$	$\frac{3.6Kt}{\phi\mu Cr_w^2}$	径向流
t_D	$\frac{3.6Kt}{\phi\mu CX_f^2}$	$\frac{3.6Kt}{\phi\mu CX_f^2}$	线性流
p_D	$772 \frac{\Psi(p) - \Psi(p_i)}{q\mu B/(Kh)}$	$1.842 \times 10^{-3} \frac{p - p_i}{q\mu B/(Kh)}$	线性流/径向流
$\Psi(p)$ 为拟压力			

二、表皮效应与表皮系数

油井附近的地层渗透率在钻井、完井以及油井压力与地层压力失去平衡的作业过程中将发生变化,井筒中大量流体和固体颗粒的流动也将使油井附近的地层渗透率受到伤害,通过消除地层伤害或增加油井产能的洗井和增产处理,地层渗透率将再次发生变化。另一方面,油井生产的射孔层段通常只是纯产油层厚度的一部分,而由射孔和射孔层段的汇聚流动也常常会引入附加压力。由于以上几方面的原因,当原油从油层流入井筒时,会在井筒附近产生一个压力降,集中在井筒周围形成一个很薄很薄的环状“表皮区”,我们把这个现象称为表皮效应。由于表皮效应的存在,使实际井的压力分布不同于理想井的压力分布,这种区别在油井附近较大,随着远离油井而减少,如图 1.1.1 所示。

理想井和实际井的井底流动压力之差 $p'_{wf} - p_{wf}$ 代表着由于地层伤害、油井附近区域增产

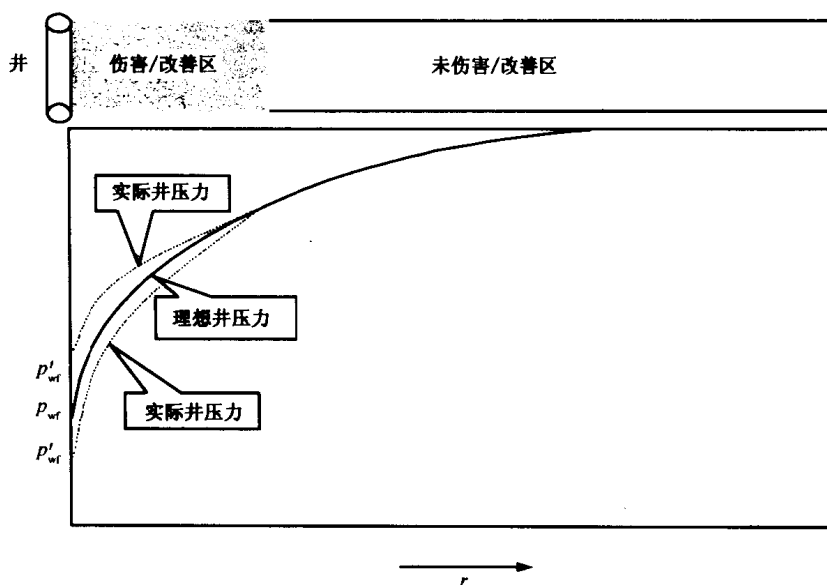


图 1.1.1 表皮效应引起的压力分布示意图

措施以及其他井入口的流阻造成的附加压力损失。通常将这个附加压力损失称为表皮压力降,而表皮系数 S 定义为正比于这个压力降,即为:

$$S = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q\mu B} (p'_{wf} - p_{wf}) \quad (1.1.9)$$

以上定义为稳态表皮效应,即将伤害带或增产带视为零,表皮效应在井底附近无限薄层上产生一附加的压力降。另一种定义为不稳态表皮效应,即不将伤害带或增产带视为零,因此,在地层中,将存在两个区:伤害区(增产区)和非伤害区(非增产区)。同时地层也将有两个不同的渗透率,设伤害区(增产区)的渗透率为 K_1 ,非伤害区(非增产区)的渗透率为 K_2 ,则表皮系数 S 定义为:

$$S = \left(\frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_{we}}{r_w} \right) \quad (1.1.10)$$

式中 r_{we} ——伤害区(增产区)带宽。

上式中,当 $K_2 \ll K_1$ 时,有:

$$S = - \ln \left(\frac{r_{we}}{r_w} \right) \quad (1.1.11)$$

故有:

$$r_{we} = r_w e^{-S}$$

上式即为有效半径的关系式(定义式)。

对于理想井来说,表皮系数表明了油井附近流体的流动特性。一般情况下,正表皮系数表示有流阻或地层伤害存在;负表皮系数表示降低了流阻或进行了增产措施。

在一口给定井中,可根据试井资料计算表皮系数。对于均质油藏中的一口井, $S > 0$, $S = 0$ 和 $S < 0$ 分别表征受伤害、未受伤害和增产措施见效,而 S 的数值表征伤害或增产措施见效的程度。这就是说:如果 $S > 0$,数值越大,表示伤害严重;如果 $S < 0$,绝对值越大,表示增产措施的效果越好。表皮系数常常与射孔打开地层的程度、酸化压裂形成措施效果程度等因素有关,形成所谓“拟表皮”的影响。这里不考虑这些因素,表皮系数可作大致分类,见表 1.1.3。

表 1.1.3 表皮系数 S 值分类表

分类级别	S 值数值量级
严重堵塞(特高)	>20
堵塞(高)	5~20
较完善(中)	1~5
完善(低)	(-1)~1
酸化(较低)	(-3)~(-1)
压裂(很低)	<(-3)

由于表皮效应使实际井产生非理想流动,其根源主要在于以下几方面:

- (1)地层伤害;
- (2)有限的完井段;
- (3)射孔效果;
- (4)高速流动(湍流);
- (5)井筒附近的饱和度阻塞;
- (6)防砂。

由常规试井模型确定的表皮系数 S 可能是某些影响流动的非理想因素的合成物,常常为几个表皮系数之和。根据常规封闭地层完善直井渗流模型可将表皮系数的分解通式写为:

$$S = S_d + S_c + (S_p + S_G + S_{dp}) + S_b + S_\theta + S_D \quad (1.1.12)$$

式中 S_d ——由侵入所造成的地层伤害表皮系数;

S_c ——部分射开所引起的完井表皮系数;

S_p ——孔眼表皮系数;

S_G ——砾石充填表皮系数;

S_{dp} ——挤压带的表皮系数;

S_b ——流体流度发生变化的拟表皮系数;

S_θ ——井斜引起的拟表皮系数;

S_D ——非达西流(高速流)引起的拟表皮系数。

将试井所测得的表皮系数分解为几个单独的部分,了解各个表皮系数的贡献,以便能够有针对性地选择有效的增产措施。多数的表皮系数目前一般还不能通过直接测量方法获得,必须根据经验方法、分析方法以及数值模拟方法等计算各个独立的表皮系数。如果求解均匀、无限大介质定产量完善直井的不稳定渗流数学模型和求解各向异性、无限大介质定产量打开不完善直井的不稳定渗流数学模型,然后在晚期段对比两个解,则可以得到该条件下打开不完善直井的表皮系数计算公式。反之,在作试井解释时使用了打开不完善直井的数学模型,在作表皮系数分解时就不能再加入部分射开表皮系数。下面分别介绍以上几部分表皮系数的计算方法。

1. 侵入伤害表皮系数

侵入流体与地层相互作用的最终结果通常是有害的,即地层伤害,引起井筒附近地带产生额外的压力损失和油井产能降低。Hawkins(1956)提出厚表皮系数模型,用井筒附近的渗透率变化来表示表皮系数,可以表示为:

$$S_d = \left(\frac{K}{K_d} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_d}{r_w} \right) \quad (1.1.13)$$

式中 K ——地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 K_d ——伤害区渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 r_d ——伤害区半径, m;
 r_w ——井筒半径, m。

实际应用时,不能直接测得伤害区渗透率和伤害区半径,必须通过表皮系数分解的方法获得伤害区的表皮系数,然后对该渗透率改变区的区域半径作出估算,再计算出伤害区的渗透率。

2. 部分射开表皮系数

从一开采开始,为了防止气顶或底水对油井生产带来不良的影响,并只打开整个油层的一部分或只在一部分进行完井,这种只射开有限产层段的完井设计称为部分射开。有时设计为完全射开,但实际射孔效果不好同样引起部分射开表皮效应。部分射开表皮系数可用下式计算:

$$S_c = \left(\frac{1}{b} - 1 \right) [\ln(h_D) - G(b)] \quad (1.1.14)$$

式中, h_D 为无量纲产层厚度, 定义为:

$$h_D = \frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (1.1.15)$$

b 为射开程度, 定义为:

$$b = \frac{h_p}{h}, 0 < b \leq 1 \quad (1.1.16)$$

$G(b)$ 用 Brons - Marting(1961) 公式计算:

$$G(b) = 2.948 - 7.363b + 11.45b^2 - 4.675b^3 \quad (1.1.17)$$

式中 h_p ——向液流敞开的厚度, m;
 h ——油层总厚度, m;
 K_h ——地层水平渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 K_v ——地层垂直渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3. 射孔表皮系数

目前,大多数油井的完井是下生产套管、注水泥,然后射孔,使油藏中的流体流入井筒内。液流经过孔眼主要是改变了井筒附近地区流线的几何形状而产生聚流效应。我们用表皮系数 S_p 来表示射孔对井壁压力的影响。 S_p 依赖于射孔孔眼的几何特性以及射孔质量,主要涉及到的参数有:

- (1) 穿射深度: 穿透越深, 性能越好;
- (2) 射孔孔眼直径: 射孔孔眼直径越大, 流动性能越好;
- (3) 射孔密度: 每米射孔孔眼数越多, 性能越好;
- (4) 相位: 对于一个给定的射孔密度, 能使射孔孔眼之间的干扰最小的相位对流动是最有效的。

Karakas - Tariq(1988) 计算射孔表皮系数公式为:

$$S_p = S_H + S_v + S_{wb} \quad (1.1.18)$$

其中垂向聚流效应计算公式为:

$$S_H = \ln\left(\frac{r_w}{r'_w(\theta)}\right) \quad (1.1.19)$$

$$r'_w(\theta) = \begin{cases} 0.25L_p, & \theta = 0 \\ \alpha_\theta(r_w + L_p) & \theta \neq 0 \end{cases} \quad (1.1.20)$$

式中 α_θ 与射孔相位角有关,见表 1.1.3,平面聚流效应计算公式为:

$$S_v = 10^a h_D^{b-1} r_D^b \quad (1.1.21)$$

上式中参数定义为:

$$h_D = \frac{h_p}{L_p} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (1.1.22)$$

$$r_D = \frac{r}{2h_p} \left(1 + \sqrt{\frac{K_v}{K_h}}\right) \quad (1.1.23)$$

$$a = a_1 \log r_D + a_2 \quad (1.1.24)$$

$$b = b_1 r_D + b_2 \quad (1.1.25)$$

其中常数 a_1, a_2, b_1, b_2 与射孔相位角有关,见表 1.1.4。

表 1.1.4 射孔表皮计算常数表

相位角, (°)	α_θ	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2
0(360)	0.250	-2.091	0.0453	5.1313	1.8672	1.6×10^{-1}	2.675
180	0.500	-2.025	0.0943	3.0373	1.8115	2.6×10^{-2}	4.532
120	0.648	-2.018	0.0634	1.6136	1.7770	6.6×10^{-3}	5.320
90	0.726	-1.905	0.1038	1.5674	1.6935	1.9×10^{-3}	6.155
60	0.813	-1.898	0.1023	1.3654	1.6490	3.0×10^{-4}	7.509
45	0.860	-1.788	0.2398	1.1915	1.6392	4.6×10^{-5}	8.791

孔眼内部效应计算公式为:

$$S_{wb} = c_1 \exp(c_2 r_{wD}) \quad (1.1.26)$$

$$r_{wD} = \frac{r_w}{L_p + r_w} \quad (1.1.27)$$

而常数 c_1, c_2 与射孔相位角有关,见表 1.1.4。

4. 砾石充填表皮系数

很多油井所处的地层是非胶结的或胶结差的砂岩,在开发过程中,砂子可能和流体一起产出,当流体经过多孔材料时,沿着流动通道产生了拉力,从而流动流体可携带相当数量的松散的、易碎的砂粒。一般来说,高产量会导致大量出砂,而出砂是油田生产所不希望的,会带来很多的负面影响。砾石充填是防止出砂一种有效的方法,恰当充填的孔眼表现出相当小的流动阻力。如果砾石与地层砂粒相混合,或被地层中小微粒侵入,则流动阻力将显著增加。由砾石充填引起的附加表皮系数可用下式来计算:

$$S_G = 8 \frac{KhL_p}{d_p^2 K_G n} \quad (1.1.28)$$

式中 L_p ——孔眼深度, m;

d_p ——孔眼直径, m;
 n ——孔眼总数;
 K_G ——砾石充填渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 Kh ——地层系数, $\text{m} \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

5. 挤压带表皮系数

射孔孔眼周围的挤压带的影响, 可用挤压带表皮系数表示, 用下式可计算得到:

$$S_{dp} = \left(\frac{K}{K_{dp}} - \frac{K}{K_d} \right) \left(\frac{h_p}{nL_p} \right) \ln \left(\frac{h_{dp}}{r_p} \right) \quad (1.1.29)$$

式中 K ——地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 K_{dp} ——挤压带的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 K_d ——井筒附近损害带渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 r_{dp} ——挤压带半径, m;
 r_p ——孔眼半径, m;
 L_p ——孔眼深度, m;
 h_p ——射孔层段, m;
 n ——孔眼总数。

Krueger(1986)对砂岩岩心室内试验的研究结果表明, 孔眼周围挤压带的厚度为 0.635 ~ 1.27cm。渗透率是未伤害渗透率的 7% ~ 20%, 若取 10%, 则 Lee 等人(1991)给出射孔表皮系数约为 15。

6. 流度表皮系数

当近井地带流体发生相态变化时, 在近井地带存在明显的流度变化, 这将产生一拟表皮系数, 由下式可计算得到:

$$S_b = \left(\frac{1}{M} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_f}{r_w} \right) \quad (1.1.30)$$

式中 M ——流度比;
 r_f ——流度变化区的半径, m;
 r_w ——井筒半径, m。

7. 井斜表皮系数

井斜引起的表皮效应, 其拟表皮系数可用 Cinco - Lee(1975)公式进行计算:

$$S_\theta = \left(\frac{\theta'_w}{41} \right)^{2.06} - \left(\frac{\theta'_w}{56} \right)^{1.865} \log \left(\frac{h_D}{100} \right) \quad (1.1.31)$$

其中有关参数定义为:

$$\theta'_w = \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{K_v}{K_h}} \tan(\theta_w) \right] \quad (1.1.32)$$

$$h_D = \frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (1.1.33)$$

式中 θ_w ——井斜角度 ($0 < \theta_w \leq 75^\circ$);
 K_h ——地层水平渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 K_v ——地层垂直渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

h ——地层厚度, m;

r_w ——井筒半径, m。

8. 高速非达西渗流表皮系数

非达西渗流(高速流)引起的拟表皮系数一般产生于气井中, 为:

$$S_D = (D_R + D_d + D_{dp} + D_G) Q_g \quad (1.1.34)$$

式中 D_R ——在井筒伤害附近区以外区域中的油层高速流动项;

D_d ——在井筒伤害附近区中的油层高速流动项;

D_{dp} ——在直接围绕射孔的伤害区中的高速流动项;

D_G ——在砾石充填孔眼中的油层高速流动项;

Q_g ——气井产量。

下面我们来推导有表皮效应影响时, 井底无量纲压力表达式。

由式(1.1.9)得:

$$p'_{wf} - p_{wf} = \frac{1.842 \times 10^{-3} q \mu S}{Kh} \quad (1.1.35)$$

井筒中流体产量为:

$$q = \frac{Khr_w}{1.842 \times 10^{-3} \mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (1.1.36)$$

故有

$$p'_{wf} - p_{wf} = \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r_w} \cdot r_w \cdot S \quad (1.1.37)$$

引入无量纲量:

$$p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q \mu B} \Delta p \quad (1.1.38)$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (1.1.39)$$

得

$$\Delta p_D = \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} \cdot S \quad (1.1.40)$$

故, 当井底有表皮效应影响时, 井底压力可写为:

$$p_{wD} = \left[p_D - \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) \cdot S \right]_{r_D=1} \quad (1.1.41)$$

三、井筒储集效应与井筒储集系数

一般情况下, 油气井测试时都是在地面开(关)井。油井刚开井或刚关井时, 地面产量与井底产量不相等。以井筒充满单相原油的情形为例, 当油井一打开, 从井口以产量 q_0 采出原油, 完全是靠井筒中被压缩的原油的膨胀而采出的, 还没有原油从地层流入井筒。这时, 井底产量为 0, 地面产量为 q_0 。后来, 随着井筒中原油弹性能量的释放, 井底产量逐渐增加, 过渡到与地面产量相等(图 1.1.2)。

在关井时, 当油井一关闭, 地面产量立即由 q_0 变为 0, 但在井底, 仍有原油从地层流入井筒, 从而使井筒压力逐渐增加, 直到与井筒周围的地层的压力达到平衡, 此时, 井底产量才变为

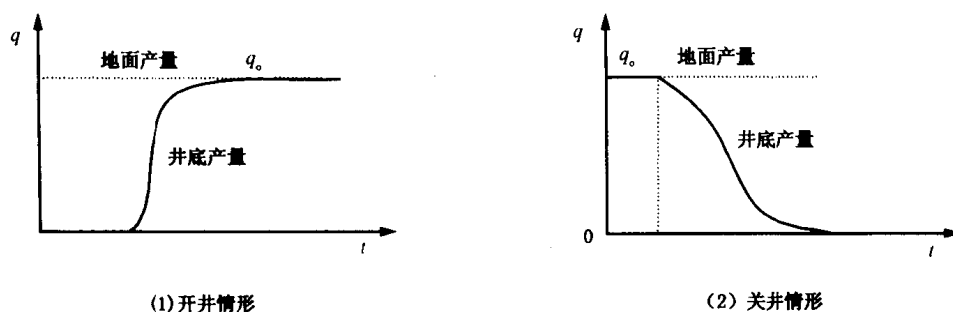


图 1.1.2 井筒储集效应示意图

0, 实现井底关井。这也就是我们常说的续流效应(图 1.1.2)。

上述当油井刚开时所出现的现象,叫做井筒储集效应。井底产量为 0(开井情形)或等于关井产量 q_0 (关井情形)的那一段时间,称为纯井筒储集阶段,简写作 PWBS(Pure Wellbore Storage)。

井筒储集效应的强弱程度用井筒储集系数 C 表示,其定义是:

$$C = \frac{dV}{dp} \approx \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1.1.42)$$

式中 C ——井筒储集系数, m^3/MPa ;

ΔV ——井筒中所储原油体积的变化, m^3 ;

Δp ——井筒压力的变化, MPa 。

井筒储集系数的物理意义是:在井筒储满单相原油的情况下,井筒靠其中原油的压缩性能储存原油,或靠释放其中压缩原油的弹性能量排出原油的能力。说得更具体一些,就是:关井时,要使井筒压力升高 1MPa ,须从地层中流入 $C(\text{m}^3)$ 原油;开井时,当井筒压力降低 1MPa 时,靠井筒中原油的弹性膨胀排出 $C(\text{m}^3)$ 原油。在实际井筒中,由于井筒中油、气、水的分离和溶解过程存在比较复杂的关系,因此,准确确定井筒储集系数值是十分困难的。但是我们仍然可以根据井的情况,大致对井筒储集系数 C 作出估算,这有助于压力资料的甄别和分析。井筒储集系数 C 值的分类见表 1.1.5。

表 1.1.5 井筒储集系数 C 值的分类表

分类级别	C 值量级, m^3/MPa	井的情况描述
特高	>10	深气井,井口关井
高	$1 \sim 10$	高含气井或油、套管液面同时恢复井
较高	$0.1 \sim 1$	含气柱井,井口关井或油管液面恢复井
中等	$0.05 \sim 0.1$	油管井口关井,中低气油比
较低	$0.01 \sim 0.05$	油管井口关井,井中为纯油、水或采用井下关井工具关井,但口袋较长
低	$0.01 \sim 0.001$	采用井下工具关井
很低	<0.001	井下关井,口袋特短

在实际井中,井筒储集系数在试井测试过程常常在变化,而井筒储集系数这种变化往往和井筒中相态重新分布有关。例如,在油管中存在气液两相流动时,井在地面关井后,重力效应会引起井筒中液体下降气体上升而产生相重新分布,这种分布是随时间变化的,进而引起井筒储集系数增加或减少。由于液体的相对不可压缩性和气体在封闭系统中无法膨胀的特点,结