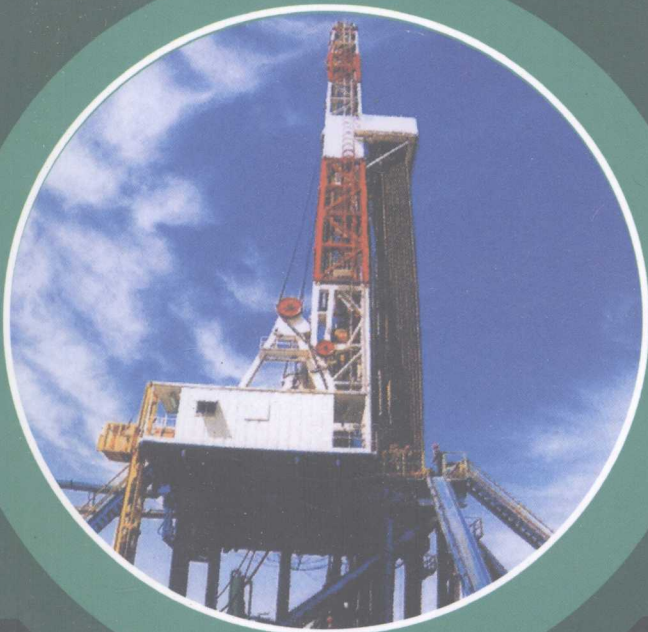


# 现代试井理论及应用

XIANDAI SHIJING LILUN JI YINGYONG

卢德唐 著



石油工业出版社

# 现代试井理论及应用

卢德唐 著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

该书全面介绍了试井分析中涉及的地层、流体、边界等的基本概念及相关的数学知识,对目前涉及的各种试井分析模型从建模、求解、编制理论图版、试井分析方法等方面进行了详尽阐述,并结合实例说明试井分析方法的应用;针对气井试井,从气体高压物性参数、渗流方程建立、产能评价及试井解释等方面进行了详尽推导;最后对一些新的试井分析方法(诸如:DST 段塞流动测试、压力及其偏差、非线性回归及边界元法等)进行了理论推导和分析。该书对评价油气藏、搞好油气藏的开发挖潜,具有十分重要的指导意义。

该书可供石油科技人员、工程技术人员和有关院校师生参考和借鉴。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代试井理论及应用/卢德唐著.

北京:石油工业出版社,2009.1

ISBN 978-7-5021-6895-7

I. 现…

II. 卢

III. 试井-研究

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 196934 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

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

---

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:20.5

字数:500 千字 印数 1—2500 册

---

定价:75.00 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

试井分析是油气田勘探开发中被广泛使用的方法，也是油藏工程师和科技人员所必备的基本知识和基本技能。我国每年都有成千上万口油气井需要进行压力测试，分析和解释这些压力资料就是试井分析的主要内容。

在油气田勘探开发中，我们仅能测出井底压力、产量及流体的高压物性参数等，而井底污染、地层渗透率和油藏边界等参数是无法测量的。这些未知的参数正是计算油藏储量、制定与调整开发方案所必需的参数，试井分析可通过对压力资料的定量解释来得到这些未知的参数。试井分析是一个反问题，即已知偏微分方程的解，反求方程中的有关系数。所采用的技术原理为：（1）根据油气藏的渗流特点建立渗流偏微分方程；（2）根据井筒情况（如是否压裂、是否全射开、是否是水平井、是否有污染等）来确定内边界条件；（3）根据三维地震等资料确定油藏的外边界条件；（4）无量纲化上述方程及定解条件并得到方程的无量纲解，最终制成标准图版；（5）由曲线拟合法、非线性回归法、直线段分析方法等得到地层参数解释结果；（6）通过无量纲 Horner 检验、历史拟合检验解释结果的准确性。

本书是作者近 20 年来试井分析的总结，着重于试井分析的基础理论，在写作上力求数学推导严谨、物理描述清晰，尽量做到深入浅出、循序渐进。第一章介绍了试井分析涉及的基本物理概念、无量纲量的定义及其渗流方程；第二章详细讨论不同油藏模型，在各种外边界条件下的线源解，并根据它们的线源解给出不同时间下井底压力所满足的渐近解；第三章重点介绍各种油藏条件下的半对数分析方法（如 MDH 分析方法、Horner 分析方法、多流量叠加分析方法等），同时也介绍其他坐标系下的直线段分析法（如井筒存储分析方法、垂直裂缝井的早期线性流分析方法等）；第四章主要讲述垂直井、均质地层，在考虑井筒存储和表皮因子后，各种外边界条件下的无量纲井底压力及其导数的表达式，同时给出图版中的典型曲线，并给出典型曲线拟合的试井分析方法，结合实例来说明试井分析方法的应用；第五章重点讨论均质各向异性地层中，部分射开井、水平井和垂直裂缝井在考虑井筒存储和表皮因子影响时的试井分析问题。针对部分射开井、水平裂缝井和水平井，探讨了底水或气顶对井底压力的影响；第六章首先从双孔或双渗的试井分析方程入手，通过对方程的求解，得到双孔或双渗试井分析的理论图版，最后给出试井分析方法，并通过实例具体说明试井分析的应用；第七章从气体高压物性参数、渗流方程建立求解等方面阐述气体试井分析中涉及的理论问题；第八章主要叙述一些新的试井分析方法，

包括 DST 段塞流动测试的试井分析方法、压力及其偏差的试井分析方法、非线性回归方法和边界元法等。

本书凝聚了中国科学技术大学渗流实验室多位老师的集体智慧，也包含着历届毕业的研究生、博士生的科研成果，在此无法一一列出。同时本书也融入了试井行业众多前辈及同行的科研成果与经验，特别是中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司、中国石油大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司、中国石油华北油田公司油气井测试公司、中国石化胜利油田井下作业公司等专家的实践经验与成果，在此表示感谢。本书还存在许多缺点与不足，欢迎提出宝贵意见与建议。

# 目 录

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第一章 基本物理概念、无量纲量的定义及其方程</b>   | (1)   |
| 第一节 基本物理概念                      | (1)   |
| 第二节 无量纲量及其定义                    | (25)  |
| 第三节 渗流力学中的基本方程                  | (33)  |
| <b>第二章 渗流方程的线源解</b>             | (39)  |
| 第一节 均质各向同性地层                    | (39)  |
| 第二节 有界均质地层线源解                   | (54)  |
| 第三节 多维空间上的解                     | (63)  |
| 第四节 径向复合油藏                      | (71)  |
| 第五节 线性复合油藏                      | (77)  |
| 第六节 双孔介质油藏线源解                   | (79)  |
| 第七节 双渗油藏线源解                     | (84)  |
| 第八节 多层油藏线源解                     | (84)  |
| <b>第三章 试井中的直线段分析法</b>           | (87)  |
| 第一节 时间较小时的直线段分析方法               | (87)  |
| 第二节 半对数分析法                      | (91)  |
| 第三节 垂直裂缝及水平裂缝半对数分析              | (102) |
| 第四节 半对数图上多条直线段的分析               | (105) |
| 第五节 其他分析方法                      | (118) |
| 第六节 直线段分析法的优缺点                  | (121) |
| <b>第四章 考虑井筒存储和表皮直井均质地层试井分析法</b> | (124) |
| 第一节 均质无限大地层直井试井分析               | (124) |
| 第二节 均质地层中有一条断层或供给边线试井           | (138) |
| 第三节 角度油藏井底压力分析                  | (145) |
| 第四节 均质地层河道状油藏                   | (153) |
| 第五节 均质地层 U 形油藏                  | (160) |
| 第六节 矩形油藏试井                      | (166) |
| 第七节 均质圆形地层中心一口井                 | (173) |
| 第八节 两区域径向复合油藏                   | (178) |
| 第九节 多区域径向复合油藏                   | (182) |
| 第十节 多流量试井中压力导数的修正               | (186) |

|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| 第十一节 多流量的压力历史拟合·····                    | (189) |
| 第五章 有井筒存储和表皮의复杂井筒条件试井·····              | (191) |
| 第一节 无限大地层中的均匀流量垂直裂缝·····                | (191) |
| 第二节 有界地层中的均匀流量型垂直裂缝·····                | (195) |
| 第三节 无限导流垂直裂缝·····                       | (197) |
| 第四节 有限传导垂直裂缝·····                       | (201) |
| 第五节 垂直裂缝井的多流量修正压力导数·····                | (207) |
| 第六节 水平裂缝井试井·····                        | (209) |
| 第七节 部分射开油层的试井分析·····                    | (211) |
| 第八节 水平井试井分析·····                        | (215) |
| 第九节 有限长度圆柱体水平井·····                     | (223) |
| 第六章 非均质地层试井·····                        | (226) |
| 第一节 双孔介质中的方程·····                       | (226) |
| 第二节 无限大地层中有 $C_D$ 和 $S$ 双孔介质井底压力的解····· | (228) |
| 第三节 双孔无限大地层试井分析·····                    | (230) |
| 第四节 有边界地层双孔模型·····                      | (233) |
| 第五节 双孔复合油藏·····                         | (237) |
| 第六节 双孔地层复杂井筒条件下井底压力·····                | (243) |
| 第七节 双渗油藏·····                           | (248) |
| 第七章 气井试井分析·····                         | (252) |
| 第一节 地层天然气的物性·····                       | (252) |
| 第二节 气体渗流微分方程·····                       | (260) |
| 第三节 气井不稳定试井分析实例·····                    | (261) |
| 第四节 气井稳定试井分析·····                       | (267) |
| 第八章 其他试井分析方法·····                       | (277) |
| 第一节 DST 段塞流的试井分析·····                   | (277) |
| 第二节 低速非达西试井·····                        | (290) |
| 第三节 其他形式的试井分析组合图版·····                  | (293) |
| 第四节 边界元方法·····                          | (302) |
| 第五节 试井参数的非线性回归·····                     | (307) |
| 符号说明·····                               | (314) |
| 参考文献·····                               | (318) |

# 第一章 基本物理概念、无量纲量的定义及其方程

## 第一节 基本物理概念

井底瞬时压力试井分析是以渗流力学为基础,以井底压力、温度和流量的测量为手段,研究油气田的地质及油井工程问题。试井分析即是对井底压力或流量进行反演分析,进而得到地层的静态参数。这些静态参数都是渗流力学中最基本的物理参数,它们涉及与流体有关的参数、与地层有关的参数和与井筒有关的参数等。本章将具体介绍和解释这些参数。

### 一、与地层有关的参数

渗流力学是研究流体通过多孔介质时的宏观流动规律。因而,“流体”和“多孔介质”是与此有关的两类物质。在试井分析中与“多孔介质”有关的就是地层。所以,下面首先定义与地层有关的参数。

#### 1. 孔隙度 ( $\phi$ )

多孔介质是内部含有孔隙的固体,对一个多孔体系来说,这些孔隙可以是彼此联通的或者是互不联通的。如果流体能通过多孔介质进行流动,那么这些多孔介质中,必然有一部分孔隙空间是彼此联通的。多孔介质体系中彼此联通的部分被称为此多孔介质中的有效孔隙。本书定义的孔隙度就是有效孔隙度。

一种多孔介质可以用各种各样的几何特征来表示其性质。其中最重要的是多孔介质中的有效孔隙体积与总体积之比,这一比值称之为孔隙度 ( $\phi$ )。由于这里研究的是多孔介质中流体运动的宏观规律,因而,对多孔介质中的流体流动也引进连续性的假设。本书所定义的孔隙度也是一个宏观的物理量,以此能用虚构的连续介质代替真实的多孔介质。在虚构的多孔介质中,需要定义一个典型单元体。典型单元体的尺度必须具有以下特征:

(1) 典型单元体的尺度应远大于多孔介质中孔隙的特征尺度,以便使得它的内部包含有足够多的孔隙而可以进行统计意义上的平均。

(2) 典型单元体的尺度与所考虑的流体流动区域相比又应足够小,以至于可以把它看成一个点。

因此,我们以后所说的油藏中某一点的概念,实际上是指以该点为质心的典型单元体。该点的各种物理量都是该典型单元体上的平均值。

根据以上的叙述,油藏中某点 ( $p$  点) 的孔隙度  $\phi(p)$  可定义为:

$$\phi(p) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow \Delta V_0} \frac{\Delta V_{pi}}{\Delta V_i} \quad (1-1)$$

式中  $\Delta V_0$ ——典型单元体体积,  $\text{m}^3$ ;



$\Delta V_i$ ——任一多孔介质的总体积,  $\text{m}^3$ ;

$\Delta V_{pi}$ —— $\Delta V_i$  中的有效孔隙体积,  $\text{m}^3$ 。

在试井分析中, 孔隙度一般都作为已知量给出, 并且一般都假定在整个地层中孔隙度是一个常数。关于孔隙度 ( $\phi$ ) 的测量请参阅参考文献 [1], 这里不再叙述。

## 2. 渗透率 ( $K$ )

渗透率 ( $K$ ) 是流体通过多孔介质能力的重要量度。它是多孔介质中的孔隙特征的重要参数。渗透率通常定义为单位时间内, 在单位压力梯度下, 黏度为 1 个单位的流体通过单位横截面积孔隙介质的体积流量。渗透率是达西 (Darcy) 定律中的比例常数。因而, 渗透率的单位也取决于表示达西定律中的各量的单位。但渗透率在量纲上与面积量纲相同, 渗透率的单位是  $\text{mD}$  (毫达西)。

岩石的渗透率是一个张量, 一般来说储油岩石不是各向同性的, 而是各向异性的。就砂岩储层来说, 除了水平和垂直方向的渗透率有差异外, 在平面上各个方向上的渗透率往往也有差异。有时, 储油砂岩在水平方向上各方向的渗透率差异不大, 可以认为是水平方向各向同性。当岩石中存在自然裂缝时 (如碳酸盐岩石由于有脆性而产生的自然裂缝), 渗透率各向异性更为突出。

在试井分析中, 渗透率都是根据井底压力通过试井分析而求出来的。求出来的渗透率都是所研究区域内的平均值。一般来说, 如果流体只沿径向流动, 且地层为均质油藏, 给出的渗透率为水平方向的平均渗透率; 如果储油层是双孔特性的油层, 给出的渗透率为自然裂缝的渗透率, 而基岩渗透率包含在窜流系数中; 如果是部分射开油藏, 能给出水平和垂直方向的渗透率; 如果是水平井, 原则上可以给出  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三个方向上的渗透率, 但由于水平方向上渗透率差异较小, 因而, 一般也只给出水平和垂直方向上的渗透率。

很明显, 由试井分析得到的渗透率是一个标量, 它是在一定意义上的平均值。因而, 由试井分析得到的渗透率往往与实验室测得的渗透率不相符合。因为实验室测得的渗透率只是某一方向上的渗透率。实验室测得的渗透率与试井分析中得到的渗透率所代表的物理意义是不相同的。

上面所讲的渗透率是指油层仅被单相流体充分饱和, 即这种流体的饱和度为 100%。这样的渗透率称为绝对渗透率。当地层中有多相流体存在时, 每相流体都有各自的渗透率, 即相渗透率, 实验证明各相渗透率总和总小于绝对渗透率。为了研究多相流体在多孔介质中的流动规律, 又引进了相对渗透率, 有关这方面的基本概念请参阅文献 [2]。

## 3. 地层有效厚度 ( $h$ )

地层有效厚度 ( $h$ ), 也是与地层有关的一个物理量。一个油藏中可以有几个含油砂层, 这时称为多层油藏, 但也可以只有一个层称为单层油藏。无论是单层或多层油藏, 在试井分析中, 都假定油藏每个单层是等厚度的, 油藏每个单层中的含油储层, 在油井打开后, 如果其中的储油层中的流体能够流动, 那么流体流动的那个储油层的厚度就是该层的有效厚度。

如果开采多层油藏中的某个单层, 一般可将井筒中上下封隔器之间的距离看成地层的有效厚度。值得注意的是: 对于井壁是部分射开的油井, 地层有效厚度并非是射开段的长度, 而是整个流体能流动的那个储油层的厚度。

## 4. 岩石压缩系数 ( $C_r$ )

岩石的压缩系数 ( $C_r$ ), 又称岩石的有效孔隙体积压缩系数。它的定义为: 单位孔隙体积每改变单位压力时其孔隙体积的变化量, 其数学形式为:

$$C_f = -\frac{1}{V_f} \frac{dV_f}{dp} \quad (1-2)$$

式中  $V_f$ ——孔隙体积,  $m^3$ ;  
 $p$ ——地层压力, MPa。

由式 (1-2) 可知,  $C_f$  的单位是压力单位的倒数。在试井分析中, 一般并不需要知道岩石压缩系数  $C_f$ , 而需要知道综合压缩系数  $C_t$ 。但可以根据岩石压缩系数、流体压缩系数、流体饱和度求出综合压缩系数  $C_t$ 。岩石压缩系数  $C_f$  可以通过实验室岩心分析测得。在无法给出岩石压缩系数  $C_f$  情况下, 可以用 Hall<sup>[3]</sup> 关系式给出 (这个关系式是根据实验数据回归得到的):

$$C_f = \frac{2.587 \times 10^{-4}}{\phi^{0.4358}} \quad (1-3)$$

式中  $C_f$ ——岩石压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;  
 $\phi$ ——孔隙度。

对于异常高压油气藏, 岩石的压缩系数可用如下经验公式给出<sup>[4]</sup>。

$$C_f = (8.7046 \times 10^{-3}L - 2.4747) \times 10^{-4} \quad (1-4)$$

式中  $L$ ——油气层的埋藏深度, m。

## 5. 油藏边界及其参数

在试井分析中, 油藏的外边界是十分重要的一个概念, 它是求解渗流力学方程的外边界条件。实际油藏的外边界是十分复杂的, 无法进行描述。在试井分析中, 只能对外边界进行理想化处理。一般考虑的外边界有如下 8 种。

(1) 无穷大边界: 这是用得最多的边界, 对无穷大外边界都假设地层为无限大, 并且在无穷远处的压力为原始地层压力。如果在测试时间内, 边界对井底压力产生影响非常小, 以至于可以忽略不计, 这时就可以用无限大边界来处理。

(2) 圆形油藏: 假设地层是圆形。如果考虑油层的厚度, 则储油空间是高为  $h$  的圆柱体。油井位于圆心处。在圆周的外边界上可以配封闭或定压形式的外边界条件。用  $R$  来表示圆的半径 (见图 1-1)。

(3) 无穷大地层中有一条断层或供给边线: 这是一个半无限大地层, 在距离井  $L$  的下方是没有油的区域, 油的流动区域仅在上半平面, 如图 1-2 所示。如果边界不渗透, 称为断层; 如果边界定压, 称为供给边线。

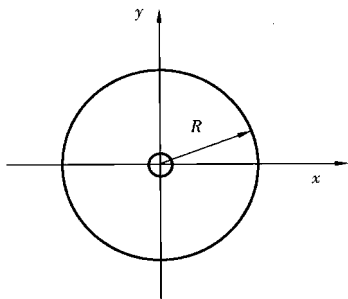


图 1-1 圆形油藏示意图

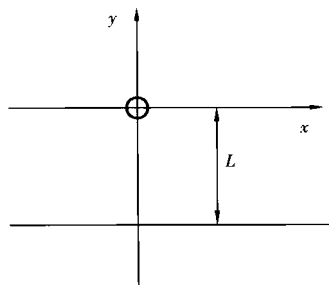


图 1-2 半无限大油藏

(4) 河道形油藏：如果储油层是介于两条平行线之间（指储油空间在水平方向上的投影），称这样的油藏为河道形油藏，如图 1-3 所示。在河道形油藏中，一般给出油井至两边界的距离  $L_1$  及  $L_2$ 。两边界中的每条边可以是定压，也可以是封闭。总的外边界条件便是这两条边的边界条件的组合，其外边界条件的组合有 3 种。

(5) 角度形油藏：角度形油藏有时也称楔形油藏或断层尖灭，它是指储油区域介于两条相交直线所构成的区域内，如图 1-4 所示。在角度形油藏中，一般要输入油井至两边的距离  $L_1$  及  $L_2$  和角度  $(\alpha)$ 。在角度形油藏中，两边界中的每条边，可以是定压，也可以是封闭。总的外边界条件便是这两条边的边界条件的组合，其外边界条件的组合有 3 种。

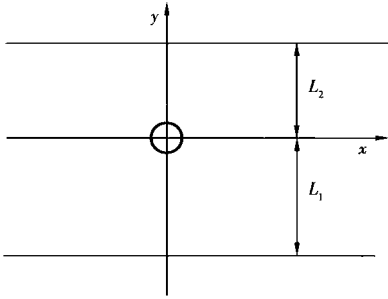


图 1-3 河道形油藏

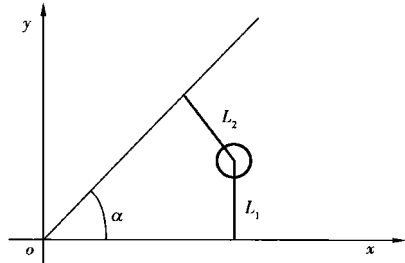


图 1-4 角度形油藏

(6) U 形油藏：油藏的储油区是由三条边所构成，如图 1-5 所示。在 U 形油藏中，一般需要输入井至各边的距离  $L_1$ ,  $L_2$  和  $L_3$ 。U 形油藏中的每个边，可以是封闭，也可以是定压。总的外边界条件便是这三条边的边界条件的组合，其外边界条件的组合有 6 种。

(7) 矩形油藏：油藏的储油区是在矩形内，如图 1-6 所示。在矩形油藏中，一般需要输入井至四边的距离  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  及  $L_4$ 。矩形油藏中的每个边，可以是封闭，也可以是定压。总的外边界条件便是这四条边的边界条件的组合，其外边界条件的组合有 9 种。

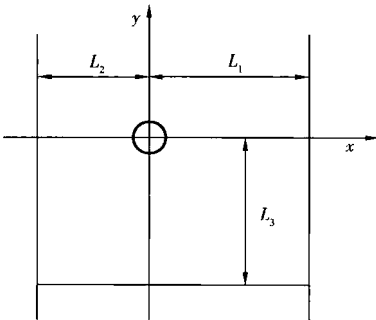


图 1-5 U 形油藏

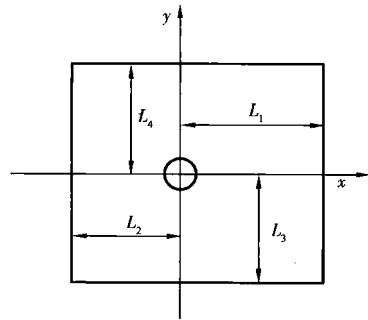


图 1-6 矩形油藏

(8) 任意外边界：如图 1-7 所示，可以用任意边界来描述真实的油藏外边界。对任意边界油藏的试井分析问题，目前，只能用数值解来求解渗流力学方程，在众多的数值解中，边界元法是最理想的数值解法。

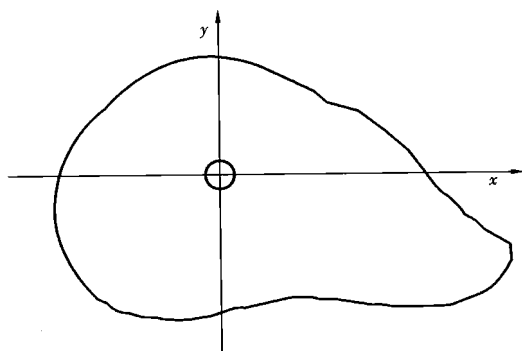


图 1-7 任意外边界油藏中的一口井

## 二、油藏流体的物理性质

与流体有关的参数有流体黏度 ( $\mu$ )、流体体积系数 ( $B$ )、流体压缩系数 ( $C_L$ )、流体密度 ( $\rho$ ) 等, 这些参数可直接应用于试井分析。在试井分析中, 这些参数一般是可以给出的, 但在无法给出的情况下, 就需要通过经验公式来估算。在本节中, 将给出计算油藏中原油及水的  $pVT$  计算公式。

### 1. 原油物性参数计算

#### 1) 原油泡点压力

泡点压力 (或饱和压力) 表示地层条件下, 原油中的溶解气开始分离出来时的压力, 大小主要取决于油、气组分和地层温度, 在  $pVT$  计算中一般采用 Standing 方法计算。

$$p_b = 0.1255[4.188(R_{sb}/\gamma_g)^{0.83} \times 10^a - 1.4] \quad (1-5)$$

其中,

$$a = 0.00091\theta - 0.0125D$$

$$\theta = 1.8(T - 273) + 32$$

$$D = (141.5/\gamma_o) - 131.5$$

式中  $p_b$ ——原油泡点压力, MPa;

$T$ ——温度, K;

$R_{sb}$ ——泡点压力下天然气在原油中的溶解度,  $m^3/m^3$ ;

$\gamma_g$ ——天然气相对密度;

$\gamma_o$ ——原油相对密度。

#### 2) 原油压缩系数

原油压缩系数 ( $C_o$ ) 是油藏弹性的一个量度。它定义为: 在地层条件下, 每变化单位压力, 单位体积原油的体积变化率, 其数学形式可写成:

$$C_o = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad (1-6)$$

式中  $C_o$ ——原油压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;

$p$ ——地层压力, MPa;

$V$ ——地层压力  $p$  下的原油体积,  $\text{m}^3$ 。

在地层压力高于饱和压力条件下, 原油的压缩系数为常数, 因此式 (1-6) 可写成:

$$\frac{dV}{V} = -C_o dp \quad (1-7)$$

对式 (1-7) 积分得到:

$$\int_{V_i}^V \frac{dV}{V} = -C_o \int_{p_i}^p dp$$

即:

$$\frac{V}{V_i} = \exp[C_o(p_i - p)] \quad (1-8)$$

式中  $V_i$ —— $p_i$  压力下的原油体积,  $\text{m}^3$ ;

$p_i$ ——原始地层压力, MPa。

由于  $C_o$  数值较小, 根据指数函数近似展开式, 方程 (1-8) 可近似写成:

$$V = V_i[1 + C_o(p_i - p)]$$

原油压缩系数 ( $C_o$ ), 一般是由实验室测得, 当无法测得这一数据时, 可以使用 Vasquez—Beggs 经验公式:

$$C_o = \frac{-1433 + 28.075R_s + 17.2\theta - 1180\gamma_{gs} + 12.6D}{10^5 p} \quad (1-9)$$

$$\gamma_{gs} = \gamma_g \left\{ 1 + 5.912 \times 10^{-5} \gamma_o(\theta) \log \left( \frac{p_{sep}}{0.791} \right) \right\}$$

式中  $\gamma_{gs}$ ——分离器基准压力 (0.791MPa) 下的气体相对密度;

$p_{sep}$ ——分离器压力, MPa;

$T_{sep}$ ——分离器温度, K;

$R_s$ ——天然气在原油中的溶解度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

### 3) 原油密度

原油密度指在标准条件下 (温度为  $20^\circ\text{C}$ , 压力为  $0.1\text{MPa}$ ) 每立方米原油质量, 在  $pVT$  计算中饱和原油与不饱和原油的密度是不同的。

不饱和原油密度的定义式:

$$\rho_o = \rho_{ob} \exp[\bar{C}_o(p - p_b)] \quad (1-10)$$

式中  $\bar{C}_o$ ——在平均压力  $\bar{p} = (p + p_b)/2$  时原油等温压缩系数;

$\rho_o$ ——原油密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

饱和油密度:

$$\rho_o = \frac{1000\gamma_o + 1.205R_s\gamma_g}{B_o} \quad (1-11)$$

式中  $B_o$ ——原油体积系数。

### 4) 原油体积系数

在地层条件下, 被天然气所饱和的原油, 当采至地面时, 由于压力和温度的降低, 溶解气从原油中就分离出来, 这样脱气后的原油体积就会缩小。因此, 原油体积系数 ( $B_o$ ) 也

是试井分析中的重要参数之一。原油体积系数定义为，采出地面条件下的  $1\text{m}^3$  脱气原油体积所占的地层原油体积量，即：

$$B_o = \frac{V}{V_s} \quad (1-12)$$

式中  $V_s$ ——地面脱气原油体积， $\text{m}^3$ 。

原油体积系数 ( $B_o$ ) 与原油中天然气的溶解量有关。因此，它是地层压力的函数。原油体积系数一般是由实验室测得，在无法测得的情况下，只能用相关经验公式给出。下面介绍不同条件下，计算原油体积系数的相关公式。

(1) 饱和压力原油体积系数 ( $B_o$ )：当地层压力  $p$  高于饱和压力  $p_b$  时，地层原油处于受压缩状态。由式 (1-12) 可以看出，某一压力  $p$  下的原油体积系数与原始压力  $p_i$  下的原油体积系数之比应与两个压力下的原油体积之比相等，即：

$$B_o/B_{oi} = V/V_i \quad (1-13)$$

式中  $B_o, B_{oi}$ ——压力  $p$  和  $p_i$  下的原油体积系数， $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

将式 (1-13) 代入式 (1-12) 中，可以分别得到以  $p_i$  及  $p_b$  表示的原油体积系数  $B_o$ ：

$$\begin{aligned} B_o &= B_{oi}[1 + C_o(p_i - p)] \\ B_o &= B_{ob}[1 + C_o(p_b - p)] \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中  $B_{ob}$ ——饱和压力  $p_b$  处的原油体积系数， $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

Standing 和 Galso 分别给出了计算饱和压力处的原油体积系数 ( $B_{ob}$ ) 的经验公式。

① Standing 的公式为：

$$\left. \begin{aligned} B_{ob} &= 0.972 + 1.1213 \times 10^{-2} F^{1.175} \\ F &= 0.1404 R_s \sqrt{\gamma_g/\gamma_o} + 5.625 \times 10^{-2} T + 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

② Galso 的经验公式为：

$$\left. \begin{aligned} \lg(B_{ob} - 1) &= 2.91329 \lg F - 0.27683 (\lg F)^2 - 6.58511 \\ F &= 0.1813 [R_s (\gamma_g/\gamma_o)^{0.526} + 5.625 \times 10^{-2} T + 1] \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

其中， $R_s = \frac{\gamma_g}{5.615} [(7.9688p + 1.4)10^4]^{1.2048}$

$$A = 0.0125D - 0.000910$$

式中  $R_s$ ——在压力  $p$  下的溶解气油比， $\text{m}^3/\text{m}^3$ ；

$\gamma_o$ ——地面脱气原油的相对密度；

$\gamma_g$ ——闪蒸分离气体的相对密度 ( $\rho_{\text{air}}=1.0$ )。

(2) 不饱和压力原油体积系数 ( $B_o$ )：当地层压力低于饱和压力  $p_b$  时，其原油的体积系数  $B_o$  可近似表示如下：

$$B_o = 1 + C_1 R_s + (C_2 + C_3 R_s)(6.4286 \times 10^{-2} T - 1) \left( \frac{1.076}{\gamma_o} - 1 \right) / \gamma_{gs} \quad (1-17)$$

式中  $C_1, C_2, C_3$  如表 1-1 所示。

表 1-1  $C_1, C_2, C_3$  与  $\gamma_o$  的关系

| 常数    | $\gamma_o \geq 0.876$    | $\gamma_o < 0.876$      |
|-------|--------------------------|-------------------------|
| $C_1$ | $2.6261 \times 10^{-3}$  | $2.6222 \times 10^{-3}$ |
| $C_2$ | 0.06447                  | 0.04050                 |
| $C_3$ | $-3.7441 \times 10^{-4}$ | $2.7642 \times 10^{-5}$ |

## 5) 原油黏度

原油黏度 ( $\mu$ ) 是试井分析中的重要参数之一。地层原油黏度除了受其地层温度和地层压力的影响外, 还受到构成原油的组分和天然气在原油中的溶解度影响。地层原油黏度随着地层温度的升高而降低, 然而实际产油层的温度几乎是恒定的。因此, 在饱和压力以上, 因受地层和其中的流体压缩性影响, 地层原油黏度随压力的升高而增大; 在饱和压力以下, 因受天然气释放的影响, 随压力的降低其黏度升高。

在原始地层压力、饱和压力及不同的脱气压力下的地层原油黏度, 需经过高压物性取样和  $pVT$  分析加以确定。当实在不具备取样和分析条件时, 可用相关经验公式给出。

(1) 地层脱气原油黏度 ( $\mu_{oD}$ ): 在地面常压的条件下, 脱气原油黏度是油田集输工程计算中极为重要的一个参数, 地面脱气原油黏度与温度有关。在我国常用  $20^\circ\text{C}$  时的黏度, 记为  $\mu_{oD}$ 。一般用下面的经验公式计算地面脱气原油黏度  $\mu_{oD}$ 。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{oD} &= C[\lg(1.076/\gamma_o - 1) + 2.1189]^D \\ C &= 205735(5.625 \times 10^{-2}T + 1)^{-3.444} \\ D &= 10.313[\lg(5.625 \times 10^{-2}T + 1) + 1.5051] - 36.447 \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

式中  $\mu_{oD}$ ——在地层温度下的脱气原油黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;

$T$ ——地层温度,  $^\circ\text{C}$ 。

(2) 在饱和压力和饱和压力以下的原油黏度: 在饱和压力及饱和压力以下的地层原油黏度可用如下的相关经验公式给出:

$$\mu = A\mu_{oD}^B \quad (1-19)$$

$$\mu_{oD} = 10^X - 1 \quad (1-20)$$

$$X = 1.7763 \times 10^{-2}Y(5.625 \times 10^{-2}T + 1)^{-1.163}$$

$$Y = 10^Z$$

$$Z = 3.0324 - 2.6602(1.076/\gamma_o - 1)$$

其中,

$$A = (5.615 \times 10^{-2}R_s + 1)^{-0.515}$$

$$B = (3.7433 \times 10^{-2}R_s + 1)^{-0.338}$$

式中  $\mu$ ——地层原油黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

式 (1-19)、式 (1-20) 的应用范围是:  $R_s = 3.56 \sim 368.67 \text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $p = 0.1013 \sim 36.30 \text{MPa}$ ;  $T = 21.13 \sim 146.23^\circ\text{C}$ ;  $\gamma_o = 0.7467 \sim 0.9593$ 。在上述应用范围下, 用式 (1-19)、式 (1-20) 求得的原油黏度平均误差为  $-1.83\%$ , 标准差为  $27.25\%$ 。

(3) 在饱和压力以上的地层原油黏度: 在饱和压力以上的地层原油黏度可用下面的相关经验公式得到:

$$\mu_o = \mu_{ob} (p/p_b)^m \quad (1-21)$$

其中,

$$m = 956.4295 p^{1.187} e^{-N}$$

$$N = 1.3024 \times 10^{-2} p + 11.513$$

式中  $\mu_o$ ——地层压力  $p$  下的原油黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;

$\mu_{ob}$ ——饱和压力  $p_b$  下的原油黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

## 2. 地层水物性参数计算

### 1) 气在水中的溶解度

在纯水中:

$$R_{sw} = [A + B(145.03p) + C(145.03p)^2]/5.615 \quad (1-22)$$

在矿化水中:

$$R_{sb} = R_{sw} \cdot SC$$

$$SC = 1 - [0.0753 - 0.000173(\theta)]S \quad (1-23)$$

其中,

$$A = 2.12 + 3.45 \times 10^{-3}(\theta) - 3.59 \times 10^{-15}(\theta)^2$$

$$B = 0.0107 - 5.26 \times 10^{-5}(\theta) + 1.48 \times 10^{-7}(\theta)^2$$

$$C = -8.75 \times 10^{-7} + 3.9 \times 10^{-9}(\theta) - 1.02 \times 10^{-11}(\theta)^2$$

式中  $SC$ ——矿化度校正系数;

$S$ ——水的矿化度, 用  $\text{NaCl}$  的质量分数表示, %。

### 2) 地层水的体积系数

纯水体积系数:

$$B_w = A_1 + A_2(145.03p) + A_3(145.03p)^2 \quad (1-24)$$

式中的系数  $A_1$ ,  $A_2$  和  $A_3$  由下式确定:

$$A_i = a_1 + a_2(\theta) + a_3(\theta)^2 \quad (i = 1, 2, 3)$$

系数  $a_1$ ,  $a_2$  和  $a_3$  分别由表 1-2 查得。

表 1-2  $A_i$  与  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  的关系

| $A_i$ | 脱水气                     |                           |                         |
|-------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
|       | $a_1$                   | $a_2$                     | $a_3$                   |
| $A_1$ | 0.9947                  | $5.8 \times 10^{-6}$      | $1.02 \times 10^{-6}$   |
| $A_2$ | $-4.228 \times 10^{-6}$ | $1.8376 \times 10^{-8}$   | $6.67 \times 10^{-11}$  |
| $A_3$ | $1.3 \times 10^{-10}$   | $-1.3855 \times 10^{-12}$ | $4.285 \times 10^{-15}$ |
| $A_i$ | 天然气饱和水                  |                           |                         |
|       | $a_1$                   | $a_2$                     | $a_3$                   |
| $A_1$ | 0.9911                  | $6.35 \times 10^{-5}$     | $8.5 \times 10^{-7}$    |
| $A_2$ | $-1.093 \times 10^{-6}$ | $-3.497 \times 10^{-9}$   | $4.57 \times 10^{-12}$  |
| $A_3$ | $-5.0 \times 10^{-11}$  | $6.429 \times 10^{-13}$   | $-1.43 \times 10^{-15}$ |



盐水体积系数:

$$B_w = B_w(SC) \quad (1-25)$$

$$SC = \{b_1(145.03p) + [b_2 + b_3(145.03p)][(\theta) - 60] + [b_4 + b_5(145.03p)][(\theta) - 60]^2\}S + 1.0$$

式中 SC——矿化度校正系数。

系数  $b_1 \sim b_5$  的数值如下:

$$b_1 = 5.1 \times 10^{-8}, b_2 = 5.47 \times 10^{-6}, b_3 = 1.95 \times 10^{-10}, b_4 = -3.23 \times 10^{-8}, b_5 = 8.5 \times 10^{-13}.$$

### 3) 地层水黏度

$$\mu_w = \exp[1.003 - 1.479 \times 10^{-2}(\theta) + 1.982 \times 10^{-5}(\theta)^2] \quad (1-26)$$

式中  $\mu_w$ ——地层水的黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

### 4) 气水界面张力

$$\begin{aligned} \sigma(137.78) &= 52.5 - 0.87018p \\ \sigma(23.33) &= 76 \exp(-0.0362575p) \\ \sigma(t) &= \left\{ \frac{(137.78 - t)1.8}{206} [\sigma(23.33) - \sigma(137.78)] + \sigma(137.78) \right\} \end{aligned} \quad (1-27)$$

式中  $\sigma(137.78)$ ——温度为  $137.78^\circ\text{C}$  时水的表面张力,  $\text{mN/m}$ ;

$\sigma(23.33)$ ——温度为  $23.33^\circ\text{C}$  时水的表面张力,  $\text{mN/m}$ ;

$\sigma(t)$ ——温度为  $t^\circ\text{C}$  时水的表面张力,  $\text{mN/m}$ 。

## 三、与井筒有关的参数

与井筒有关的参数很多,它们也是试井分析中重要的参数。从求解方程的角度来讲,它们都是与内边界条件有关的一些物理量。下面分别介绍这些参数。

### 1. 井结构参数

#### 1) 油井半径 ( $r_w$ )、垂直裂缝井的裂缝半长 ( $x_f$ )、水平裂缝井的裂缝半径 ( $r_f$ )

油井半径 ( $r_w$ ) 是试井分析中一个重要的参数,除垂直裂缝井、水平裂缝井以外,都要用到油井半径  $r_w$ ,它是无量纲化中的基准参数(除垂直裂缝井、水平裂缝井外)。在地层渗流中,地层中的流体最终要到达以  $r_w$  为半径的井筒内,试井分析中所说的井底压力和流量都是取在  $r_w$  上的压力和流量(见图 1-8)。

在垂直裂缝井中,没有油井半径的概念,而是用垂直裂缝的半长  $x_f$  代替油井半径  $r_w$ 。在垂直裂缝井中,所有的无量纲量都是以  $x_f$  为基准,地层流体流动到裂缝中,所取的压力及流量都是裂缝中的压力与流量。垂直裂缝井图,如图 1-9 所示。

在水平裂缝井中,也没有油井半径的概念,而是用水平裂缝的半径  $r_f$  代替油井半径  $r_w$ 。在水平裂缝井中,所有的无量纲量都是以  $r_f$  为基准,地层流体流动到裂缝中,所取的压力及流量都是裂缝中的压力与流量。