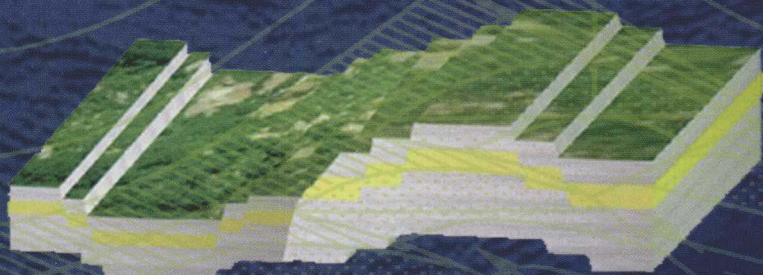


LIYONG YALI HUIFU QUXIAN
JISUAN DICENG YALI

利用压力恢复曲线 计算地层压力

唐祖奎 著



石油工业出版社

利用压力恢复曲线 计算地层压力

唐祖奎 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地、创新性地研究了利用压力恢复曲线计算地层压力的新方法,包括无限大地层和有界地层、井筒储集系数变与不变等不同情况。本书所取得的成果在理论上很有突破,具有较高的使用价值,为当前生产中所需。

本书可供从事油气田勘探和生产动态管理的研究人员使用,也可作为大专院校石油工程专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

利用压力恢复曲线计算地层压力 / 唐祖奎著
北京:石油工业出版社,2012.8
ISBN 978-7-5021-9106-1

I. 利…
II. 唐…
III. 压力恢复—曲线—计算—地层压力
IV. TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 116892 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

编辑部:(010) 64523589 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

880×1230 毫米 开本:1/32 印张:2.75

字数:58 千字 印数:1—1000 册

定价:15.00 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

笔者经过 8 年野外石油地质勘探工作，21 年油田开发实践后，于 52 岁开始从事研究工作。实践中发现低渗透层、低产井很难取得有关压力资料，对油田动态分析很不利，此问题一直困扰着笔者。通过不断地研究、实际应用，得到了利用压力恢复曲线计算地层压力的新方法。利用压力恢复曲线计算地层压力，专业性强，对笔者来说，需扩充数学、物理、英语和计算机知识，尽管困难，还是下定决心尝试。计算机给各种计算压力方法在实践中检验提供了便利条件。经过多次反复，不断完善。从 1982 年到 1989 年退休前完成了前两个专题的雏型，一直到现在近 30 年才完整地形成本书论述的方法。

第一章的内容为压力恢复曲线续流段 C 值不变计算无界场压力方法，从前人只能估算压力，提高到本书的精确计算压力。第二章提出：用类似无界场 Horner 法求有界场压力，并求出了 r_e ；定压边界 p_i 与封闭边界 \bar{p}_i 压力可以互换；证明了前人实践中发现的（未经证明的）压力曲线出现直线段 t_e 比压力恢复曲线大 4 倍；得出了注水井网和生产井网求生产井压力。这两章数据推导较严谨，方法较新，成果可用性较强。第三章讲述了在 C 值变化的续流段中计算压力的方法。第四章在第三章基础上，利用巴利索夫油、水两相近似渗流理论求出 S_o 及相关参数和压力。第五章讲述了合采井计算小层的压力方法。这三章成果与原始资料准确与否有关，尤其是直线段或拟直线段的资料要准确，有多样性的情况，若

操作者实践经验强或资料较准确，结果就较好。利用上述 5 章成果编成一个应用程序，可求出上述任一条件下的地层压力，便于操作应用。

在本书的研究过程中，通过在大庆油田用续流段与直线段求压力，压力相差小，在允许的误差范围内。大庆油田注水网过去用封闭边界求压，应加上 $0.652i$ ，变为定压边界压力（已采用）；华北油田留 17 断块低渗透油田续流段求 r'_e ，它小于井距的 $\frac{1}{3}$ 左右，致使注水效果差，应加密井网。由此说明对当前低渗透油田用本书方法效果较好。

在本书的研究过程中，得到了丁贵明、王子武的关怀与亲自指导。现场应用过程中，得到中国石油大庆油田有限责任公司第三采油厂蒋德珍，中国石油华北油田公司第三采油厂王荣堂、赵英等配合，成功应用到实际井的工作中。中国石油大庆油田有限责任公司第三采油厂李国淑提供了许多现场资料，中国石油华北油田公司采油工艺研究院薛改珍编制了稿件电子版。本书书稿承蒙多个专家审阅，在此对上述人员表示衷心的感谢！

目 录

第一章 无界场续流段 C 不变计算地层压力的方法	1
第一节 基本方程	1
第二节 续流量系数 C_q 求法	6
第三节 参数计算	8
第二章 有界场压力恢复曲线计算地层压力的方法	10
第一节 直线段计算地层压力	10
第二节 续流段 (C 值不变) 计算地层压力	21
第三节 方法分析	22
附录	31
第三章 井筒储集系数不稳定的续流段 求地层压力的方法	35
第一节 已知近稳定生产时间 t_{pas} 计算地层压力	35
第二节 已知供应边界 r_e 计算地层压力	42
第三节 求近稳定生产时间 t_{pas} 的方法	42
第四节 方法分析	45
第五节 实例	47
第四章 油水两相渗流求地层压力的方法	50
第一节 基本方程	51
第二节 求平均含油饱和度等有关参数	54
第三节 实例	58
第五章 合采小层压力计算方法	60
第一节 基本方程	60
第二节 参数的取得	74

第三节 实例·····	75
符号说明·····	78
参考文献·····	80

第一章 无界场续流段 C 不变计算 地层压力的方法

压力恢复曲线往往受续流影响，尤其在低渗透层，压力恢复曲线长时间内甚至不出现直线段，很难求地层压力。国内外在续流段除样版曲线法外，一般用续流量校正或经验公式代替续流量校正计算直线段斜率，不能直接求地层压力^[1~3, 7]。1955年，R.E.Gladfeiter, G.W.Tracy, L.E.Wiley提出在续流段利用续流量求直线段斜率，估算地层压力。本章主要介绍在续流段利用井筒储集系数不变（实际不需要实测续流量）求直线段斜率和地层压力的方法。

第一节 基本方程

在无穷大地层中一口油井生产的条件下，单相可压缩液体在弹性油层中渗流的基本规律可表示为热传导型方程：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial t}$$
$$p(r, 0) = p_i \quad p(\infty, t) = p_i$$
$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{q_o B_o \mu_o}{2\pi K h} \quad (1-1)$$

考虑表皮系数 S ，其解为：

$$p_{wf} = p_i + 9.09 \times 10^{-4} \frac{q_o B_o \mu_o}{Kh} \left[\text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta t} \right) - 2S \right] \quad (1-2)$$

式中 r_w ——油井半径，m；
 η ——导压系数， m^2/s ；
 t ——时间，s；
 K ——渗透率，D；
 h ——油层厚度，m；
 μ_o ——原油地下黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；
 q_o ——原油地面生产量， m^3/d ；
 B_o ——原油体积系数；
 p_{wf} ——流压，MPa；
 p_i ——地层压力，MPa。

设原油生产时间 t_p ，以 q_o 地面产量生产，以后油井关井时间为 t_n 。关井时间间隔 $[0, t_n]$ 分为 n 份，分法不等， n 为 1, 2, 3... n ，时间间隔 $[t_{n-1}, t_n]$ 中 q_n 为平均续流量（相当地面产量生产），见图 1-1。

经压力叠加后 p_n (p_n 为关井时间 t_n 时的井底压力)：

$$p_n = p_i + \frac{i}{2.3q_o} \left[q_o \left[\text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n + t_p)} \right) - \text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta t_n} \right) \right] + q_1 \left[\text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta t_n} \right) - \text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n - t_1)} \right) \right] + \dots + q_{n-1} \left[\text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n + t_{n-2})} \right) - \text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n - t_{n-1})} \right) \right] + q_n \left[\text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n - t_{n-1})} \right) - 2S \right] \right] \quad (1-3)$$

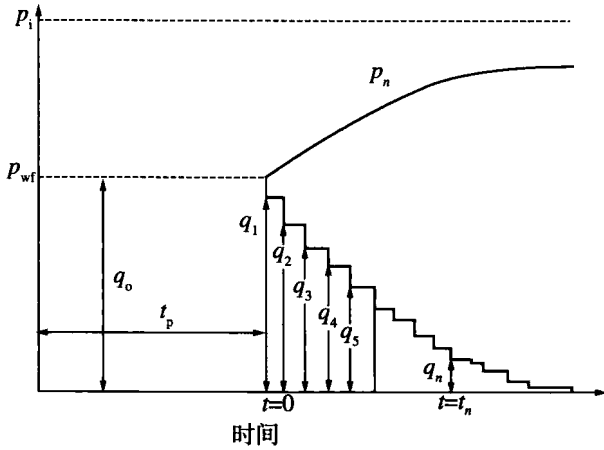


图 1-1 关井前后井底压力随时间变化的曲线

式中：

$$i = 20.9 \times 10^{-4} q_o B_o \mu / (Kh)$$

经整理后（时间单位换算为小时）得：

$$\begin{aligned} (p_n - p_{wf}) \frac{q_o}{q_o - q_n} = i \left(\lg \frac{8100 \eta t_p}{r_w^2} + \lg \frac{t_n}{t_p + t_n} + \frac{q_n}{q_o - q_n} \lg \frac{t_p}{t_p + t_n} + \right. \\ \left. \frac{q_1}{q_o - q_n} \lg \frac{t_n - t_1}{t_n} + \dots + \frac{q_{n-1}}{q_o - q_n} \lg \frac{t_n - t_{n-1}}{t_n - t_{n-2}} + \right. \\ \left. \frac{q_n}{q_o - q_n} \lg \frac{t_n}{t_n - t_{n-1}} + 0.87S \right) \end{aligned} \quad (1-4)$$

根据物质平衡原理，油井关井后在井筒储集系数不变的情况下可得：

$$C \Delta p_n = q_n \Delta t_n B_o / 24 \quad (1-5)$$

$$\Delta p_n = p_n - p_{n-1}$$

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$$

$$\frac{q_n}{q_0} = \frac{24C \Delta p_n}{B_0 q_0 \Delta t_n} = C_q \frac{\Delta p_n}{\Delta t_n} \quad (1-6)$$

$$C_q = 24C / (B_0 q_0) \quad (1-7)$$

式中 C ——井筒储集系数, m^3/MPa 。

C_q ——续流量系数, $\text{h} \cdot \text{MPa}^{-1}$, 随开井产量而变化, 在公式运算中用它比较方便。

当 $t_n \rightarrow \infty$ 时, 式 (1-4) 右端括号内除 $\lg \frac{8100\eta t_p}{r_w^2} + \frac{q_n}{q_0 - q_n} \lg \frac{t_p}{t_p + t_n} + 0.87S$ 外, 其他各项均为零 (设 t_1, \dots, t_{n-1} 为有限值)。

$i \left(\lg \frac{8100\eta t_p}{r_w^2} + 0.87S \right)$ 是一个常数 $p_i - p_{wf}$ 。当关井时

间 $t_n \rightarrow \infty$ 时, 因 p_n 不能超过 p_i , p_{n-1} , p_n 为有限值, 由式 (1-6) $q_n \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned} \lim_{t_n \rightarrow \infty} \frac{q_n}{q_0 - q_n} \lg \frac{t_p}{t_p + t_n} &= \lim_{t_n \rightarrow \infty} \frac{24C}{q_0 B_0} \frac{p_n - p_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \lg \frac{t_p}{t_p + t_n} \\ &= \lim_{t_n \rightarrow \infty} \frac{24C}{B_0 q_0} \lg \frac{t_p}{t_p + t_n} / \frac{t_n - t_{n-1}}{p_n - p_{n-1}} \\ &= \lim_{t_n \rightarrow \infty} \frac{-10C}{B_0 q_0 t_p} \frac{p_n - p_{n-1}}{t_p + t_n} = 0 \end{aligned} \quad (1-8)$$

式 (1-4) 左端 $\lim \frac{q_0}{q_0 - q_n} \rightarrow 1$, 这就说明 $t_n \rightarrow \infty$ 时,

式 (1-4) 不但可求 i 值, 还可求地层压力 $p_n \rightarrow p_i$ 。

根据杜哈美原理把变流率看作多流率问题, 可得到连续型求压公式。如果把关井时间间隔 $[0, t_{n-1}]$ 划分 $n-1$ 等份, $t_1 = \Delta t, t_2 = 2\Delta t, t_n = n\Delta t$, 则式 (1-3) 化为:

$$p_n = p_i + \frac{i}{2.3q_0} \sum_{j=0}^{n-1} q_j \left[-\frac{d}{dt} \text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n - t)} \right) \right]_{t=t_j + \theta_j \Delta t} \times \Delta t + \frac{iq_n}{2.3q_0} \left[\text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n - t_{n-1})} \right) - 2S \right]$$

式中 $0 < \theta_j < 1$, 积分得:

$$p_n = p_i + \frac{i}{2.3q_0} \left\{ \int_0^{t_{n-1}} \frac{q_n}{t_n - t} e^{-r_w^2/4\eta(t_n - t)} dt - q_n \left[\text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n - t_{n-1})} \right) - 2S \right] \right\} \quad (1-9)$$

显然, $t_n \rightarrow \infty$ 积分号内 q_n 均为有限值, 积分为零。按前述:

$$q_n \text{Ei} \left(\frac{-r_w^2}{4\eta(t_n - t_{n-1})} \right) = C_q \frac{p_n - p_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \ln \frac{-r_w^2}{2.25\eta(t_n - t_{n-1})} \rightarrow 0, \\ q_n \rightarrow 0, p_n \rightarrow p_i$$

令 $t_{n-1} \rightarrow t_n$, 则上式变为:

$$p_n = p_i + \frac{i}{2.3q_o} \int_0^{t_n} \frac{q_n}{t_n - t} e^{-r_w^2/4\eta(t_n-t)} dt \quad (1-10)$$

式 (1-10) 即是杜哈美原理^[1]。

将式 (1-6) 代入式 (1-4)，则得到求压力和 i 值的公式：

$$\begin{aligned} \frac{p_n - p_{wf}}{1 - C_q \Delta p_n / \Delta t_n} = i \left[\lg \frac{t_n}{t_p + t_n} + \frac{C_q \Delta p_n / \Delta t_n}{1 - C_q \Delta p_n / \Delta t_n} \lg \frac{t_p}{t_p + t_n} \right. \\ + \frac{C_q (p_1 - p_{wf}) / t_1}{1 - C_q \Delta p_n / \Delta t_n} \lg \frac{t_n - t_1}{t_n} + \\ \frac{C_q (p_2 - p_1) / (t_2 - t_1)}{1 - C_q \Delta p_n / \Delta t_n} \lg \frac{t_n - t_2}{t_n - t_1} + \dots \\ + \frac{C_q (p_{n-1} - p_{n-2}) / (t_{n-1} - t_{n-2})}{1 - C_q \Delta p_n / \Delta t_n} \lg \frac{t_n - t_{n-1}}{t_n - t_{n-2}} + \\ \left. \frac{C_q \Delta p_n / \Delta t_n}{1 - C_q \Delta p_n / \Delta t_n} \lg \frac{t_n}{t_n - t_{n-1}} + p_i - p_{wf} \right] \end{aligned} \quad (1-11)$$

第二节 续流量系数 C_q 求法

续流量系数 C_q 的取得有以下两种方法。

1. 静态法

根据井筒内液面恢复的物质平衡原理，有：

$$B_o q_n \Delta t_n = 24 H \pi r_w^2 \quad (1-12)$$

$$\Delta p_n = H\rho_o/102 \quad (1-13)$$

式中 H ——井筒液面恢复高度, m;

ρ_o ——井筒原油密度, t/m^3 。

由式 (1-6)、式 (1-12) 和式 (1-13) 转化为:

$$C_q = \frac{2448\pi r_w^2}{q_o B_o \rho_o} \quad (1-14)$$

其中, $\Delta t_n \rightarrow 0$, $q_n \rightarrow q_o$ 。

2. 双对数曲线初期法

根据式 (1-6):

$$\bar{q}_n / q_o = \bar{C}_q (p_n - p_{wf}) / t_n \quad (1-14a)$$

其中, \bar{q}_n 为 $[0, t_n]$ 内平均流量。

用双对数坐标 $\lg(p_n - p_{wf})$ 与 $\lg t_n$ 画图。关井初期极短时间内, 续流量与关井前产量趋于相等 ($\bar{q}_n \approx q_o$), 出现斜率为 1 的直线段, 即:

$$\lg(p_n - p_{wf}) = \lg t_n + T'$$

从中可以求:

$$\bar{C}_q = 10^{-T'} \quad (1-15)$$

或:

$$\bar{C}_q = t_n / (p_n - p_{wf}) \quad (1-16)$$

其中, T' 为任一常数。

第三节 参数计算

压力恢复曲线除计算地层压力之外，还需计算下列一般参数。

由公式得：

$$i=20.9 \times 10^{-4} q_o B_o \mu l / (Kh)$$
$$K=20.9 \times 10^{-4} B_o q_o \mu_o J / (ih) \quad (1-17)$$

表皮系数：

$$S = 1.15 \left(\frac{p_i - p_{wf}}{i} - \lg \frac{Kt_p}{\phi C_t \mu_o r_w^2} - 0.91 \right) \quad (1-18)$$

$$r_d = 0.87iS \quad (1-19)$$

有效半径：

$$r_{we} = r_w e^{-S} \quad (1-20)$$

孔隙体积压缩系数：

$$C_f = \frac{p_i - p_{wf} - r_d}{p_i - p_{wf}} \quad (1-21)$$

综合压缩系数：

$$C_t = S_o C_o + S_w C_w + C_r \quad (1-22)$$

导压系数：

$$\eta = 10^{-3} K / (\phi \mu_o C_t) \quad (1-23)$$

井筒储集系数：

$$C=q_o B_o C_q / 24 \quad (1-24)$$

式中 C_f ——完善系数；
 r_d ——井壁阻力，MPa；
 r_{we} ——井底有效半径，m；
 S_o, S_w ——含油、含水饱和度；
 C_o, C_w, C_r, C_t ——油、水、岩石、总压缩系数，MPa⁻¹。

第二章 有界场压力恢复曲线计算地层压力的方法

有界场用直线段计算地层压力的方法，国外常用的有 MBH 法、MDH 法、迪茨法等，国内常用的有松辽法等。本章介绍压力恢复两个方程，即近稳定生产时间 t_{pas} 、直线段结束时间 t_e 、边界因子 $R_q (R'_q/4)$ 三者关系 ($t_{\text{pas}}/t_e=10$, $t_{\text{pas}} \cdot R_q=0.634$)。这是揭露压力恢复曲线特殊性的两个方程，从而建立求地层压力的两个模式，求压方便，还可探边。在这基础上提出了在续流段内， C 值不变情况下计算有界场地层压力方法。

第一节 直线段计算地层压力

前人在压力恢复曲线计算直线段有界场地层压力方法常用的是 MBH 法和 MDH 法等。本书方法是利用类似无界场 Horner 法求有界场地层压力方法，经查阅相关文献，前人还没有这方面的研究，该方法简便、易用，在现场应用效果较好。该方法分两种情况：即已知近稳定生产时间 t_{pas} 计算地层压力和已知供应边界 r_e 计算地层压力。