

实用油田压力恢复曲线 分析方法

王福林 编著

石油工业出版社

实用油田 压力恢复曲线分析方法

王福林 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

我国油田已广泛应用压力恢复曲线研究油田开采中的问题。本书主要收集了大庆油田常用的压力恢复曲线分析方法,内容包括用压力恢复曲线求油田地层压力、计算油层动态参数、研究油井完善程度、确定断层以及计算原油储量等。

本书内容实在,实用性强,适合油田开发开采工程技术人员和石油院校有关专业师生使用和参考。

实用油田压力恢复曲线分析方法

王福林 编著

*

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 6 插页 2 字数 162 千字 印数 1—6,270

1979年9月北京第1版 1979年9月北京第1次印刷

书号 15037·2069 定价 0.83 元

限国内发行

前 言

编制油田开发方案和进行油田动态分析，必须准确地知道有关油层性质的各项参数，其中包括有效渗透率(K)、导压系数(κ)、折算半径(r_e)、完善系数(η)、流动系数($\frac{Kh}{\mu}$)、地层压力(P_K)、流动压力(P_e)……等。而应用压力恢复曲线方法就能够获得地层的这些最重要参数。

压力恢复曲线是指油气井在生产一段时间后短期关井，在关井时间内用井下仪表测出井底压力随时间恢复的关系曲线。由于曲线的形状反映了油层中流体渗滤阻力的大小变化，因此可以通过它来对井底和地层内部一些重要特征进行定量分析研究，解决油田开采中的许多问题，如用短期关井求地层压力，计算油层动态参数，研究油井完善程度，确定断层位置，分析油层流体性质以及计算储量等。目前压力恢复曲线方法已成为研究油井、油田动态的重要工具，在国内外油气田开发中得到广泛的应用。

本书收集了国内油田常用的部分方法，这些方法都是各油田的现场工作同志们的劳动成果，其中王德民同志编写的方法收集较多，编者只是汇总和加了一些粗浅意见。编写的目的是为了学习交流、抛砖引玉。在编写过程中得到了兄弟油田现场同志提供数据和方法，特别是王德民、李保树等同志的协助，童宪章工程师在百忙中认真的校改，在此一并向这些同志表示感谢。由于编者的水平所限，书中一定存在许多缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

一九七八年十月

目 录

一、压力恢复曲线的基本原理和形状	1
(一) 基本原理	1
(二) 曲线形状	8
二、压力恢复曲线的应用	10
(一) 用压力恢复曲线求油田开发初期油井原始地层压力	10
1. 实测法	10
2. 压力梯度法	12
3. 赫涅尔法	13
4. 长期关井短时放喷井的测压方法(D V法)	17
(二) 用赫涅尔法求原始地层压力的改进和校正	23
1. 赫涅尔法所存在的问题和动地层压力的含意	23
2. 赫涅尔法求地层压力的改进	25
3. 关井前产量不稳定对恢复曲线影响的校正	26
(三) 用压力恢复曲线求油田开发过程中油井地层压力	29
1. 求生产井泄油面积内动地层压力的方法(D I法)	29
2. 缩短生产井测压关井时间的方法(D III法)	37
3. 关井后有续流情况下求动地层压力的 方法(D II法)	40
4. “驼峰”和“蛇曲”曲线的解释及处理方法(D IV法)	51
5. “上翘”和“下降”曲线的解释及处理方法(D VI法)	63
6. 曲线不正常井的测压方法(D VII法又名A法)	71
7. 关井最高压力加斜率简易计算法	73
8. 三点法计算地层压力的方法	77
9. 压力恢复速度法	84
10. 稳定时间法和动地层压力法	89
(四) 用压力恢复曲线求含油层参数	96
1. 油层参数的定义	97

2. 计算公式	97
(五) 用压力恢复曲线求油井完善程度等参数	100
1. 油井完善系数(η)	102
2. 油井完善指数(η')	104
3. 井壁阻力 (R_d)	106
4. 井壁阻力系数(S)	106
5. 折算半径(r_c)	107
6. 计算油井完善程度几点补充	109
三、压力下降曲线的应用	112
(一) 压液后关井压降曲线求低渗透油层流动 系数的方法	112
(二) 注水井压力下降曲线求油水界面距离和 地层压力的方法	121
1. 求油水界面距离	121
2. 求地层压力	125
(三) 用停注三小时的压降资料求注水井地层压力的方法	129
四、不关井测压资料的应用	134
(一) 不关井求地层压力的方法(又名稳定法)	134
1. 理论基础	134
2. 试验结果	136
3. 结论	137
(二) 不关井不下压力计求地层压力的方法	138
1. 理论方法	139
2. 计算结果	144
3. 结论	144
(三) 利用流动压力确定地层压力的不关井测压方法	145
1. 理论依据	146
2. 计算结果	147
3. 结论	148
(四) 改变工作制度确定地层压力的方法(H II法)	149
五、“断层反映”曲线的应用	153
(一) 断层反映的理论和确定不渗透边界形状	154

1. 直线不渗透边界	154
2. 两个互成 120° 角的直线不渗透边界	156
3. 两个互成 90° 角的直线不渗透边界	157
4. 三个互成 90° 角的直线不渗透边界	158
5. 生产井位于两个互相平行的直线不渗透边界之间	159
(二) 求地层参数和地层压力	160
1. 求流动系数	160
2. 求折算半径	160
3. 求不渗透边界距离	160
4. 求地层压力	162
六、测压资料计算储量的应用	167
(一) 求原始地质储量的方法	167
(二) 求开发过程中储量的方法	170
附录(一) 常用单位换算表	174
1. 压力单位换算表	174
2. 流量单位换算表	174
3. 时间换算表	174
4. 公制与英美制单位换算表	175
5. 公制单位换算表	176
6. 常用参数换算表	176
附录(二) 幂积分函数表	177
附录(三) 所用符号及其单位	182
参考文献	185

一、压力恢复曲线的基本原理和形状

(一) 基本原理

压力恢复曲线实质上是关井后地层内不稳定运动液流引起井底压力变化的具体反映。由于油层中的液体和岩石都具有一定的弹性，当油井工作制度改变时，油层压力就会重新分布，逐渐恢复到相对的平衡状态。压力恢复速度的快慢与油层性质和流体性质有关，即与产量 (ΔQ_t)、流动系数 ($\frac{Kh}{\mu}$)、导压系数 (κ)、折算半径 (r_e)、供油半径 (R_K)、压力 (P_K) 等参数有关。油层性质和流体性质越好，油层的参数越大，则压力恢复速度就越快，反之就越慢。因此，压力变化与产量变化及地层情况有一定的对应关系。应用压力恢复曲线研究这种对应关系所得到的有关含油层参数，可作为油田动态分析和合理开发油田的可靠依据。

用数学式表示就是要研究：

$$\Delta P_t = f \left(\Delta Q_t, \frac{Kh}{\mu}, \kappa, r_e, \frac{R_K^2}{\kappa}, P_K \dots \right) \quad (1-1)$$

测得 ΔP_t 与 ΔQ_t 的关系后就可以确定 $\frac{Kh}{\mu}$ 、 κ 、 r_e 、 P_K 等含油层参数。

在 (1-1) 式中 ΔP_t 与 ΔQ_t 是随时间变化的函数，其余各参数只是座标位置的函数，我们一般很少研究 (1-1) 式最一般的解，其原因是：

1. 目前还没有能够找到一种最一般的能用现有函数表示出来的解。

2. 通常所采用的试井方法及地层的实际情况使得我们在大多数情况下不必考虑过于复杂的情况。

3. 很多比较复杂情况的解可以用最简单情况解的迭加或变换而得到。

因此，我们先研究一下处理压力恢复曲线最常用情况的解。

根据弹性理论，在厚度和渗透率为常数的均质弹性油层中，当油层压力高于原油饱和压力时，油层中渗滤的将是可压缩的单相液体。这样，当改变生产井（或注入井）的工作方式时（关井、投产或更换油嘴），油井周围压力的不稳定变化将满足下面的热传导型微分方程式：

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1-2)$$

式中 P ——地层中任一点的压力，厘米；

r ——油层中任一点距井轴的距离，厘米；

t ——时间，秒；

κ ——导压系数 $\left(\kappa = \frac{K}{\mu \beta^*} \right)$ ，厘米²/秒。

(1-2) 式的物理意义是：如果地层和流体的导压系数为 κ ，当流体向生产井方向作径向流动时，在距井任意半径 r 处压力 P 乃是时间 t 的函数。如要求得关井后（或投产）压力在油层中的不稳定的重新分布过程，就需要根据具体的边界条件，若假设为：

1. 均质油层是无限延伸的；
2. 井径无限小，即井可认为是无限小的点汇；
3. 从投产瞬时起，油井立即以稳定产量生产。

在上述条件下解 (1-2) 式可求得距井轴 r 处地层内任一点上的压力 P 变化为：

$$P = P_0 + \frac{Q\mu}{4\pi Kh} Ei \left(-\frac{r^2}{4\kappa t} \right) \quad (1-3)$$

式中 P ——任意 t 时刻，距井轴 r 处地层内任一点的压力，大气压；

P_0 ——原始地层压力，大气压；

t ——油井生产时间，秒；

Q ——生产井的稳定产量(在地层条件下)，厘米³/秒；

μ ——地下原油粘度，厘泊；

K ——有效渗透率，达西；

h ——油层有效厚度，厘米；

$Ei(-x)$ ——幂积分函数；

其他符号同前。

幂积分函数 $Ei(-x) = -\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$ 可以分解为无限极数，它的写法有下列几种：

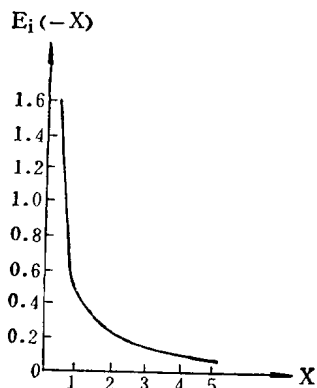


图 1 幂积分函数曲线

$$Ei(-x) = 0.5772\cdots + \ln x - x + \frac{x^2}{2 \times 2!} - \frac{x^3}{3 \times 3!} + \frac{x^4}{4 \times 4!} \cdots$$

$$\text{或 } Ei(-x) = \ln x + C_e + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(-1)^v}{v \cdot v!} x^v$$

式中 $C_e = 0.5772\cdots$ 欧拉常数

$Ei(-x)$ 函数中 $x > 0.01$ 时可由专门的表查得，详见附录

(二)。\$x < 0.01\$ 时可用下式近似计算：

$$Ei(-x) \approx \ln x + 0.5772 \quad (1-4)$$

因为我们测得的是井本身的压力变化，因而 (1-3) 式中的 \$r\$ 应换为井的折算半径 \$r_c\$，同时随着时间的增大，\$\frac{r_c^2}{4\kappa t}\$ 会变得越来越小，几分钟以后就会出现 \$\frac{r_c^2}{4\kappa t} < 0.01\$，所以 (1-3) 式可以写为下列近似式：

$$\begin{aligned} P_o - P &\approx \frac{Q\mu}{4\pi Kh} \left(\ln \frac{4\kappa t}{r_c^2} - 0.5772 \right) \\ &\approx \frac{Q\mu}{4\pi Kh} \ln \frac{2.25\kappa t}{r_c^2} \\ &\approx 0.1832 \frac{Q\mu}{Kh} \lg \frac{2.25\kappa}{r_c^2} + 0.1832 \frac{Q\mu}{Kh} \lg t \end{aligned} \quad (1-5)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } \frac{r_c^2}{4\kappa t} \leq 0.01 \text{ 时式 (1-5) 与精确公式 (1-3) 比较误差只有 } 0.25\% \\ \frac{r_c^2}{4\kappa t} \leq 0.03 \text{ 时式 (1-5) 与精确公式 (1-3) 比较误差只有 } 1\% \\ \frac{r_c^2}{4\kappa t} \leq 0.1 \text{ 时式 (1-5) 与精确公式 (1-3) 比较误差只有 } 5.7\% \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

在复杂的有限地层条件下，研究有限圆形油藏中心有一口生产井以稳定产量瞬时投产后所引起的压力变化公式为：

$$P_o - P = \frac{Q\mu}{2\pi Kh} \left[\ln \frac{R_K}{r} - 2 \sum_{v=1}^{\infty} \frac{J_o(x_v r/R_K) e^{-x_v^2 F_o}}{x_v^2 J_o^2(x_v)} \right] \quad (1-7)$$

式中 \$R_K\$——供油半径，厘米；
\$J_o\$——贝塞尔函数；

x_v ——为特征方程 $J_1(x)=0$ 的根；

F_0 ——富里叶函数， $F_0 = \frac{\kappa t}{R_K^2}$ ；

其他符号同前。

但在很多矿场实际中，可用式 (1-5) 代替复杂公式 (1-7) 来计算投产所引起的压力变化。

当 $R_K \geq 1000 r_c$ 而：

$$\left. \begin{aligned} F_0 = \frac{\kappa t}{R_K^2} \leq 0.2 \text{ 时式 (1-5) 与有限地层公式} \\ \quad \quad \quad (1-7) \text{ 比较误差为 } 0.08\% \\ F_0 = \frac{\kappa t}{R_K^2} \leq 0.35 \text{ 时式 (1-5) 与有限地层公式} \\ \quad \quad \quad (1-7) \text{ 比较误差为 } 1\% \\ F_0 = \frac{\kappa t}{R_K^2} \leq 0.5 \text{ 时式 (1-5) 与有限地层公式} \\ \quad \quad \quad (1-7) \text{ 比较误差为 } 1.9\% \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

如把条件 (1-6) (1-8) 结合起来，就掌握了理论公式 (1-5) 在有限地层中的应用范围和误差范围。

若 (1-5) 式中用投产 t 秒时间井底流压 $P_{c(\text{大气压})}$ 代替油层中任一点压力 $P_{(\text{大气压})}$ ，则可以表示投产后的井底压力变化规律如下：

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{(r_c, t)} = P_0 - P_c = \frac{Q\mu}{4\pi Kh} \ln \frac{2.25\kappa}{r_c^2} + \frac{Q\mu}{4\pi Kh} \ln t \\ \text{或 } \Delta P_{(r_c, t)} = P_0 - P_c = 0.183 \frac{Q\mu}{Kh} \lg \frac{2.25\kappa}{r_c^2} + 0.183 \frac{Q\mu}{Kh} \lg t \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

将压力恢复曲线绘于 $\Delta P_i \sim \lg t$ 座标后可得一条直线 (图 2)。其斜率：

$$i = \operatorname{tg} \theta = 0.183 \frac{Q\mu}{Kh} \quad (1-10)$$

而截距：

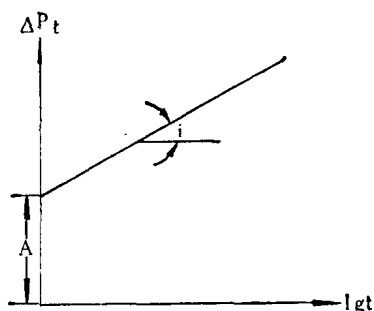


图 2 理论压力恢复曲线

$$A = 0.183 \frac{Q\mu}{Kh} \lg \frac{2.25\kappa}{r_c^2} \quad (1-11)$$

从而可求得油层的流动系数，井的折算半径及其他参数。

由 (1-10) 式可得：

$$\left. \begin{aligned} \frac{Kh}{\mu} &= 0.183 \frac{Q}{i} \quad (Q \text{ 在地层条件下的}) \\ &\quad (C-G-S \text{ 制单位}) \\ \text{或} \quad \frac{Kh}{\mu} &= \frac{21.9Qb}{ir} \quad (Q \text{ 在地面条件下和}) \\ &\quad (\text{换为实用单位}) \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式中 b —— 体积系数 (无因次)；

r —— 原油比重 (无因次)。

由 (1-11) 式可得：

$$r_c = \sqrt{\frac{2.25\kappa}{10^i}} \quad (1-13)$$

故式 (1-9) 又可写成：

$$\Delta P_{(r_c, t)} = P_o - P_c = A + i \lg t \quad (1-14)$$

以上公式是最常用最简单的情况，只有油井及地层在下列简化条件下才是正确的。这些条件为：

1. 无限大地层；
2. 厚度为常数的均质地层，顶层和底层都是不渗透的，地层参

数不受压力变化的影响；

3. 地层为均质液体所饱和，它的粘度不随压力的变化而变化；

4. 地层内液体渗滤服从达西定律，地层与液体的体积弹性变形服从虎克定律；

5. 油层驱动方式为弹性驱动；

6. 关井或投产前，地层处于稳定状态；

7. 地层中仅有一口生产井工作；

8. 油井产量为常数；

9. 生产井井底在水动力学上是完善的；

10. 井筒中液流摩擦阻力和惯性力可以忽略不计；

11. 压力变化所引起的井筒中液体弹性体积的变化可忽略不计；

12. 井径很小。

如果在上述12个条件中，某些条件与实际情况不相符时，是不关紧要的，因为有的不反映在曲线形状上；而有的虽反映在曲线形状上，但它们的影响可以计算出来。当条件1、2、3、6、7、9得到满足时，液体在地层中的运动就是平面径向流动。另一方面，大量实际资料证明，在一般刚性水压驱动情况下，在半对数坐标上，实测压力恢复曲线的直线部分总是和理论压力恢复曲线非常接近重合，所以用公式(1-9)解释压力恢复曲线的直线部分是可以的。

如若实际情况与上述条件不符时，我们经常可以用(1-3)式的迭加或简单变换来求解，并不需要另作复杂的数学推导。

例如：

1. 运用压力波迭加的原理可以解决下述问题：

(1) 试井前 $Q_i \neq$ 常数的情况；

(2) 试井前 $P_i \neq$ 常数的情况；

(3) 关井前(或改变生产制度后) $Q_i \neq$ 常数即有续流的情况；

(4) 多层压力恢复曲线的问题等。

2. 运用镜像反映可以解决下述问题：

(1) 井附近有断层(此时 $R_K \rightarrow \infty$)；

(2) 井附近有明显渗透边界或不渗透边界;

(3) 井附近有明显流动系数 $\left(\frac{Kh}{\mu}\right)$ 及导压系数变化带等。

(二) 曲线形状

由于实际油井的条件与推导公式(1-3)时有所不同,因而实测压力恢复曲线的形状如图3所示可分为四个线段。

第 I 线段—续流线段

受关井后续流的影响而呈现出弯曲形状。续流为正值时,第 I 线段位于第 II 线段延长线的下面(图3中的 a),续流为负值时,曲线位于第 II 线段延长线之上(图3中的 b)。

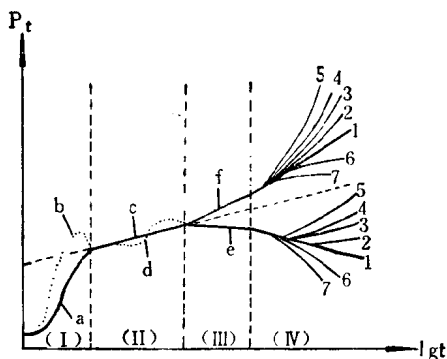


图 3 实测压力恢复曲线

理论压力恢复曲线形状呈直线状,只是在假设油井在井底立即关闭,并且关井后立即停止续流(供给液流)的条件下得出的。实际上,油井是在地面上关闭的,在关井后液体仍以几乎不变的速度流入井眼。因为井筒中的液体是可压缩的,特别是生产时井筒中脱气,在套管环形空间聚积有大量的可压缩气体,所以只有经过一段时间,当井眼内充满液体以后,续流才趋于零。由于上述原因,故

压力恢复曲线初始段有滞后现象呈弯曲状（如图3中的a）。

另一种情况，地面关井后井底附近油气流入井眼，这时在密闭的井筒中气体上升到油井的上部，而油沉到油井的下部，在很短时间内井底压力猛然上升，升高速度异乎寻常，2~3小时可升高几个甚至几十个大气压。这种现象常会造成曲线第Ⅰ段中间某部分上跳呈“驼峰”形（如图3中的b）。

第Ⅱ线段—斜率线段

通常情况下，此时流入井中的续流量已经很少，其影响可以忽略，因而出现在一个直线段（图3中的c），它真实地反映了地层压力恢复情况。在多层压力恢复情况下，油井压力是各小层压力按阻力平衡而主要反映了高渗透层压力的综合压力，影响曲线形状复杂。如某些井层间矛盾突出，先是高渗透低压层恢复平衡后，继有低渗透高压层恢复迭加，造成压力恢复曲线呈“蛇曲”形（图3中的d）介于第Ⅱ与第Ⅲ线段之间。这与上述第Ⅰ线段“驼峰”形曲线不能混为一谈。“驼峰”曲线无明显直线段拐点出现，而“蛇曲”曲线初始段有明显直线段拐点出现。至于其它先是高渗透高压层恢复，则低渗透低压层已受综合平衡，出现曲线形状无怪现象。

第Ⅲ线段—边缘线段

通常解释压力恢复曲线，都用无限大地层弹性方程（1-3）式考虑，但实际用到有限地层上是要受一定的时间限制的，如果恢复时间太长，供给边缘将开始影响曲线形状：如若边界为小区封闭的，则曲线位于第Ⅱ线段延长线的下方（图3中的e）；如边界为不渗透边界、断层、注水强度影响等，则曲线位于第Ⅱ线段延长线之上（图3中的f）。

第Ⅳ线段—干扰线段

第Ⅳ线段主要受周围邻井激动干扰影响，如邻井采油、诱喷、溢流、水力压裂、停止和猛烈注水或遇到附近有断层等干扰影响，会使曲线压力原波迭加压力反射波形成曲线上升，或迭加吸蚀波形成曲线下降变成不同形状不同倍数上翘下降。

若油藏为水压驱动且注采比大于1，则曲线上升（图3中2,3,4，

5)。如若油藏是消耗或注采比小于1的情况下开采,则曲线下降(图3中6,7)。图3中1为压力恢复原波曲线,2为一个直线不渗透边界,3为相交120度二个不渗透边界,4为二个平行不渗透边界,5为三面包围的不渗透边界,6为一个直线渗透边界,7为三面包围的渗透边界。

必须说明,有些井的实测压力恢复曲线会出现四个线段,但大部分井不一定同时都出现四个线段,如有的井地层条件差,渗透率不好就只出现第Ⅰ段,或只出现ⅠⅡ段、ⅡⅢ段,甚至有的井受注水干扰影响ⅡⅢ段不明显,直接出现ⅠⅣ段。因此,在实际工作中要善于分析判断。

二、压力恢复曲线的应用

(一) 用压力恢复曲线求油田开发

初期油井原始地层压力

由于油层是一个互相连通的统一水动力系统,油田在开采以前整个油层是处于均衡受压状态,这时油层内各处的压力称为原始地层压力。根据原始地层压力的大小,可以鉴别油田驱动能量的大小,衡量油井自喷能力的强弱,所以油田投入全面正式开采之前,必须求得准确的原始地层压力。

国内油田在探井和开发初期的油井中求原始地层压力应用过实测法、梯度法、赫涅尔法,长期关井后短时放喷测压法等。

1. 实测法

新开发的油田,在油井射孔诱喷以后,未试采之前即将压力计下到井中油层中部深度关井测压。关闭足够的时间,使油层压力恢复并趋于相对平衡后所测得的最高压力值,即为原始地层压力。若应用一般10小时的时钟压力计不能满足地层压力恢复平稳,应采取连续测压。