

根据压力恢复曲线求地层参数的几个简便方法^{* 1)}

李永善 陈鼎

(中国科学院兰州地质研究所)

提 要

本文提出了几种利用压力恢复曲线求地层参数的理论公式。在供给油流时,使用这些公式整理压力恢复曲线要简便得多,且可以直接用于解决油矿生产实际问题。

由于不稳定试井方法有很多优点^[1],因此这方面的研究工作进展得非常快。目前用压力恢复曲线计算地层参数和井底折算半径的方法已有二十多种^[2,3]。它们可分成两大类:一类是不考虑关井后供给油流的计算方法;另一类是考虑关井后供给油流的计算方法。第二类是第一类的进一步发展^[1],更加接近实际情况,理论上也更严格,但是计算过程复杂得多。现在我们提供几个这方面的简便方法。

主 要 符 号

ΔP_e 或 $\Delta P_e(t)$ 是关井后井底的压力变化(大气压);
 $\Delta P_K(t)$ 是关井后井口环形空间的压力变化(大气压);
 $\Delta P_o(t)$ 是关井后井口油管的压力变化(大气压);
 $\Delta H(t)$ 是抽油井关井后的井内液面变化(cm);
 f_K, f_o 分别为环形空间和油管的截面(cm²);
 γ 是井筒原油的平均比重(g/cm³);
 $V(t)$ 是地面关井后由地层流入井筒的总油量(或称累积供给油流)(cm³);
 $q(t)$ 是地面关井后每单位时间由地层流入井筒的油量(或称供给油流)(cm³/s);
 Q_0 是关井前油井的稳定产量(cm³/s);
 h 是地层有效厚度(cm);
 K 是地层有效渗透率(达西);
 μ 是原油粘度(厘泊);
 κ 是地层导压系数(cm²/s);
 r_e 是油井折算半径(cm);
 t 是时间,由关井开始算起(s);
 τ 是积分变量或时间的积分变量,它变化于 0 和 t 之间(s)。

* 1963年6月29日收到;1965年11月22日收到修改稿。

1) 本文初稿曾在1963年10月中国力学学会流体力学学术讨论会上宣读。

—

如果我们将关井后的累积供给油流用 $V(\tau)$ 表示, 那么供给流 $q(\tau)$ 可写成

$$q(\tau) = \frac{\partial V(\tau)}{\partial \tau}. \quad (1)$$

因为关井后的压力变化可写成^[4]

$$\Delta P_e = \frac{\mu}{4\pi K h} \int_0^t \frac{Q_0 - q(\tau)}{t - \tau} e^{-\frac{r_c^2}{4\kappa(t-\tau)}} d\tau, \quad (2)$$

所以将式(1)代入式(2), 得到

$$\begin{aligned} \Delta P_e = & \frac{\mu}{4\pi K h} \int_0^t \frac{Q_0}{t - \tau} e^{-\frac{r_c^2}{4\kappa(t-\tau)}} d\tau - \\ & - \frac{\mu}{4\pi K h} \int_0^t \frac{\frac{\partial V(\tau)}{\partial \tau}}{t - \tau} e^{-\frac{r_c^2}{4\kappa(t-\tau)}} d\tau. \end{aligned} \quad (3)$$

公式(3)右方第一项的积分部分可简化为

$$\int_0^t \frac{Q_0}{t - \tau} e^{-\frac{r_c^2}{4\kappa(t-\tau)}} d\tau \approx Q_0 \ln \frac{2.25\kappa t}{r_c^2}; \quad (4)$$

第二项的积分部分经过简单的推导¹⁾后可写成

$$\int_0^t \frac{\frac{\partial V(\tau)}{\partial \tau}}{t - \tau} e^{-\frac{r_c^2}{4\kappa(t-\tau)}} d\tau \approx \bar{V}(t) - S_1 + \frac{r_c^2}{4\kappa} S_2. \quad (5)$$

在一般情况下, $\frac{r_c^2}{\kappa} \leq 0.01s$, 因此与 S_1 比较, $\frac{r_c^2}{4\kappa} S_2$ 可以忽略不计, 故将式(4)与式(5)代入式(3), 最后得

$$\Delta P_e = i \left[\ln t - \frac{\bar{V}(t) - S_1}{Q_0} \right] + B. \quad (6)$$

式中

$$i = \frac{\mu Q_0}{4\pi K h}; B = \frac{\mu Q_0}{4\pi K h} \ln \frac{2.25\kappa}{r_c^2}; \bar{V}(t) = \frac{V(t)}{t_0} \Big|_{t_0=1s}; S_1 = \int_0^{t-1} \frac{V(\tau)}{(t-\tau)^2} d\tau. \quad (6a)$$

对自喷井, $V(t)$ 可按下面公式来计算^[4]:

$$V(t) = \frac{10^3}{\gamma} [f_{\kappa}(\Delta P_e(t) - \Delta P_{\kappa}(t)) + f_u(\Delta P_e(t) - \Delta P_c(t))];$$

对抽油井,

$$V(t) = f_{\kappa} \Delta H(t).$$

—

根据实际资料分析的结果, 一般情况下都可以近似地认为 $V(\tau) = \frac{V(t-1)}{\sqrt{t-1}} \sqrt{\tau}$. 将

1) 在推导过程中, 凡遇到 $\exp \frac{r_c^2}{4\kappa(t-\tau)}$ 可以用 1 近似地代替的地方, 都用 1 来代替; 同时还假设在 t 至 $t-1$ 之间 $V(\tau) = V(t)$.

此式代入(6a),并注意到,关井后最初几分钟的资料实际上是不能用的,则当 $t \geq 100\text{s}$ 时,可得

$$\Delta P_e = i \left[\ln t - \frac{\bar{q}(t)}{Q_0} \ln 2 \sqrt{t} \right] + B, \quad (7)$$

式中 $\bar{q}(t) = \frac{V(t)}{t}$, B, i 与式(6)中之 B, i 相同.

同理,如果假设 $Q_0 - q(\tau) \approx a \sqrt{\tau}$,则由式(2)可得到常见的折算压力公式¹⁾:

$$\frac{\Delta P_e Q_0}{Q_0 - q(t)} \approx \frac{\mu Q_0}{4\pi K h} \ln \frac{1.22x}{r_c^2} + \frac{\mu Q_0}{4\pi K h} \ln t. \quad (8)$$

到目前为止,Чарный 的积分公式^[4]虽然严格,但是非常复杂.我们在文献[5]中把它简化了,而在文献[3,5]中都证明了简化后的公式与原公式精确度实际上一样.若把文献[5]的简化公式微分一次,则得另一个简便公式

$$\frac{\Delta P_e Q_0}{Q_0 - q(t)} = \frac{\mu Q_0}{4\pi K h} \ln \frac{2.25x}{r_c^2} + \frac{\mu Q_0}{4\pi K h} \left[\ln t - \frac{\bar{q}(t)}{Q_0 - q(t)} \right]. \quad (9)$$

三

为了进一步讨论上述方法的正确性和适用范围,我们采用了两种典型的理论供给油流曲线作如下的讨论.

计算时采用的参数为: $K = 0.6$ 达西; $r_c = 10 \text{ cm}$; $\mu = 2.22$ 厘泊; $x = 8000 \text{ cm}^2/\text{s}$; $Q_0 = 1000 \text{ cm}^3/\text{s}$; $h = 10 \text{ m}$. 采用的供给油流曲线为²⁾

$$q(t) = Q_0 e^{-0.00007t}.$$

按上述公式计算出的结果列入表1和表2,并按表中之数据作出图1和图2.

可以看出,按本文公式计算的结果很不错. 这些结果与同文献[5,6]的计算结果几乎

表1 按公式(7)和(8)计算出的结果

$q(t) = Q_0 \cdot e^{-0.00007t}$					
按 公 式 (7)				按 公 式 (8)	
t	$\bar{q}(t)/Q_0$	$\lg t - \frac{\bar{q}(t)}{Q_0} \lg 2 \sqrt{t}$	ΔP_e	$2 \lg 2 \sqrt{t} - 0.87$	$\Delta P_e Q_0 / (Q_0 - q(t))$
600	0.954	1.165	2.296	2.51	3.194
1200	0.916	1.386	2.446	2.81	3.404
2400	0.906	1.579	2.574	3.112	3.604
3600	0.893	1.713	2.664	3.286	3.724
4800	0.85	1.86	2.764	3.414	3.874
6000	0.817	1.767	2.854	3.51	
7200	0.794	2.086	2.914	3.588	3.954
8400	0.754	2.213	2.994	3.656	4.004
9600	0.725	2.321	3.074	3.714	

1) 该公式为经验公式^[1,5].

2) 另一种曲线为 $q(t) = Q_0 e^{-0.0007t}$, 计算结果略.

沒有差別。此外,我們也用本文公式(7)對 Соколовгорское 油田 71 號井的實測壓力恢復曲線作了計算,其結果也很好(見表 2 和圖 2)。所有這些都說明,本文建議的公式是正確的實用的。

表 2 利用公式(7)整理出的 71 號井的壓力恢復曲線數據

t	$\ln t$	$\bar{q}(t)$	$\bar{q}(t)/Q_0$	$\ln t - \frac{\bar{q}(t)}{Q_0} \ln 2\sqrt{t}$	ΔP_c
1200	7.08	222.69	0.132	6.52	6.039
2400	7.77	131.08	0.0775	7.415	6.408
3600	8.20	106.49	0.063	7.900	6.778
4800	8.45	97.75	0.0578	8.165	7.147
6000	8.70	81.12	0.0480	8.458	7.223
7200	8.90	72.79	0.0431	8.68	7.383
8400	9.03	65.99	0.039	8.826	7.513
9600	9.15	60.89	0.036	8.96	7.643
10800	9.30	55.48	0.0328	9.125	7.706
12000	9.40	51.29	0.0304	9.237	7.756
13200	9.47	48.71	0.0288	9.314	7.894
14400	9.55	45.41	0.0269	9.403	7.941
15600	9.65	42.66	0.0252	9.51	7.990
16800	9.70	40.44	0.0239	9.567	8.051
18000	9.80	38.61	0.0228	9.673	8.118
19200	9.85	36.60	0.0216	9.726	8.148
20400	9.90	34.95	0.0206	9.783	8.197

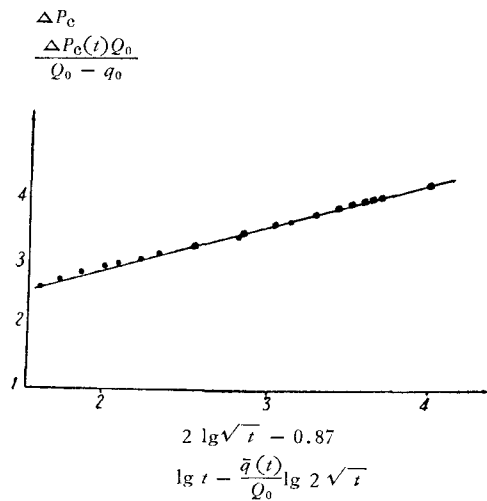


圖 1 理論壓力恢復曲線
● 按本文公式(7) ■ 按本文公式(8)

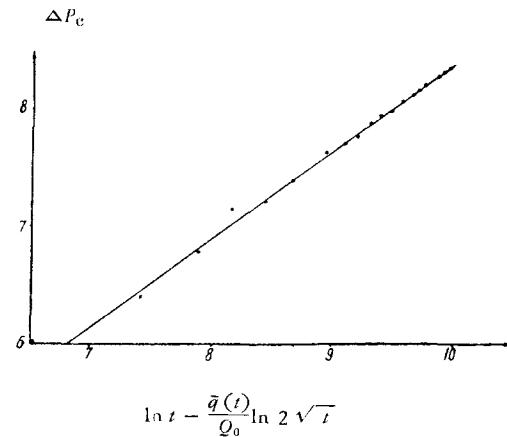


圖 2 實測壓力恢復曲線

参 考 文 献

- [1] Щелкачев, В. Н., Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме, Гостоптехиздат, 1959.
- [2] Чернов, Б. С. и др., Гидродинамические методы исследования скважин и пластов, Гостоптехиздат, 1960.
- [3] Шагиев, Р. Г., Сопоставление различных гидродинамических методов определения параметров пласта по кривым восстановления забойного давления, *Известия "Нефть и газ"*, 6, 1962.
- [4] Чарный, И. А. и Умрихин, И. Д., Об одном методе определения параметров пласта по наблюдениям неустановившегося режима притока к скважинам, *МВО, МНИ*, 1957.
- [5] 李永善 (Ли Юн-шан), Сравнение некоторых формул исследования скважин с учетом притока жидкости после ее остановки, *Известия "Нефть и газ"*, 5; 7, 1960.
- [6] Требин, Ф. А., Борисов, Ю. П., Мухарский, Э. Д., К определению параметров пласта по кривым восстановления давления с учетом притока жидкости в скважину после ее закрытия, *Нефтяное хозяйство*, 8; 9, 1958.

О НЕКОТОРЫХ ПРОСТЫХ МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТА ПО КРИВЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Ли Юн-шан Чен Дян

(Ланьчжоуский геологический институт АН Китая)

Резюме

В данной статье предложены некоторые новые формулы определения параметров пласта по кривым восстановления давления, которые, повидимому, являются наиболее простыми и эффективными в практическом приложении среди существующих формул с учетом притока жидкости после закрытия скважины на устье.