

引用格式:陈元千,石晓敏.弹性二相法新式的推导及应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):135-140.

CHEN Yuanqian, SHI Xiaomin. Derivation and application of a new formula of the elastic two-phase method[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 135-140.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.001

弹性二相法新式的推导及应用

陈元千,石晓敏

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:对于定容封闭气藏,当气井以稳定产量开井生产后,根据井底流动压力与时间的变化动态,可划分为非稳定阶段、过渡阶段和拟稳定阶段。其中的非稳定阶段称为弹性一相阶段,拟稳定阶段称为弹性二相阶段。后者是评价气井控制原始地质储量(OGIP)的重要方法。陈元千于1991年提出的拟稳定阶段的弹性二相法,在中国得到了广泛的重视和应用,被连续多次列于中华人民共和国石油天然气行业标准。基于在有限封闭边界气藏内,一口以稳定产量生产的气井,考虑天然气、岩石和束缚水的弱弹性膨胀作用的扩散方程,经推导得到了由井底流动压力与累积产量表示的拟稳定阶段弹性二相法的新式。该式可用于评价气井控制的原始地质储量(OGIP),它优越于由井底流动压力与时间关系表示的原式,克服了因产量波动对评价结果造成的影响。通过实测应用表明,弹性二相法的新式是实用有效的。

关键词:定容封闭气藏;拟稳定阶段;弹性二相法;原始地质储量;新式;推导;应用

中图分类号:TE3

文献标识码:A

Derivation and application of a new formula of the elastic two-phase method

CHEN Yuanqian, SHI Xiaomin

(CNPC Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: For volumetric closed gas reservoirs, when the gas well produces with stable production rate, it can be divided into unsteady state stage, transient stage and pseudo steady state stage according to the variation behaviours of flowing bottom hole pressure and producing time. The unsteady state stage is called the elastic one-phase stage, and the pseudo steady state stage is called the elastic two-phase stage. The latter is a dynamic method to evaluate the Original Gas in Place (OGIP) controlled by gas wells. The elastic two-phase method proposed by CHEN Yuanqian in 1991 in the pseudo steady state stage has been repeatedly listed in the National Oil and Gas Industry Standards, and has been widely valued and applied in China. Based on the diffusion equation considering the elastic expansions of natural gas, rock and irreducible water in a gas well with stable production in the finite closed gas reservoir boundary, a new elastic two-phase method for the pseudo steady state stage represented by flowing bottom hole pressure and cumulative production rate is derived, which can be used to evaluate the original gas in place (OGIP) controlled by a gas well. The new formula of elastic two-phase method is superior to the old formula which based on the relationship between flowing bottom hole pressure and production time, and the new can overcome the influence of production fluctuation on the evaluation results. The application shows that the new formula of elastic two-phase method is practical and effective.

Keywords: volumetric closed gas reservoir; pseudo steady state stage; elastic two-phase method; original gas in place; new formula; derivation; application

收稿日期:2022-06-14。

第一作者简介:陈元千(1933—),男,教授级高级工程师,1952年考入清华大学石油工程系,1956年毕业于原北京石油学院钻采系,长期从事油气藏工程、油气田开发和油气储量评价工作。地址:北京市海淀区志新北里16号楼东楼706号,邮政编码:100083。
E-mail:shixiaomin1@petrochina.com.cn

对于定容封闭气藏,基于矿场试井压降曲线测试的基本原理和方法,陈元千^[1]于1991年提出的拟稳定阶段的弹性二相法,是评价气井控制的原始地质储量(OGIP)的重要方法。该法多次被列入中华人民共和国石油天然气行业标准(SY/T 6098—1994, SY/T 6098—2000, SY/T 6098—2010, SY/T 6098—2020报批),可广泛应用于常规气,或非常规致密气、页岩气和裂缝气,井控原始地质储量的评价,这有利于天然气开发利用的规划部署。对于定容封闭气藏,当气井以稳定产量开井生产,在井控范围内压力动态达到等速下降($\partial p_{wf}/\partial t = \partial p/\partial t = \partial p_e/\partial t = \partial \bar{p}/\partial t = \text{const.}$)时,即进入拟稳定阶段。该阶段的井底流动压力随时间成直线下降关系,这就是弹性二相法的压降曲线特征^[2]。但当气井的产量存在波动时,会对评价的结果造成影响。正鉴如此,对于定容封闭气藏,基于扩散方程,对气井拟稳定阶段的弹性二相法,以SI基础单位进行了较为完整的推导,得到了井底流动压力与累积产量新的关系式。

1 弹性二相法新式的推导

对于有限边界、各向同性的均质定容气藏,在地层流体和岩石的弱弹性驱动作用下,当气井以稳定产量生产的压力动态处于非稳定阶段时,描述径向流的扩散方程为^[2-4]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\varphi \mu_g C_t}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

式中:

$$C_t = C_{gi} S_{gi} + C_w S_{wi} + C_f \quad (2)$$

对于定容封闭、边界为 r_e 的圆形气藏,当气井以稳定产量生产的压力动态进入拟稳定阶段时,可得出如下的物质平衡关系:

$$q_g B_g t = \pi r_e^2 h \varphi C_t (p_i - \bar{p}) \quad (3)$$

由式(3)对时间求导得:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = - \frac{q_g B_g}{\pi r_e^2 h \varphi C_t} \quad (4)$$

在拟稳定阶段,当气井控制范围内,各处的压力动态进入等速下降,即 $\partial p_{wf}/\partial t = \partial p/\partial t = \partial p_e/\partial t = \partial \bar{p}/\partial t = \text{const.}$ (常数)时,将式(4)的 $\partial \bar{p}/\partial t$ 代入式(1)的 $\partial p/\partial t$ 得:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = - \frac{q_g B_g \mu_g r}{\pi r_e^2 K h} \quad (5)$$

对式(5)积分得:

$$r \frac{\partial p}{\partial r} = - \frac{q_g B_g \mu_g r^2}{2 \pi r_e^2 K h} + C_1 \quad (6)$$

为了确定式(6)中的积分常数 C_1 ,取 $r = r_e$,而在 r_e 处的 $\partial p/\partial r = 0$,因此,由式(6)得:

$$C_1 = \frac{q_g B_g \mu_g}{2 \pi K h} \quad (7)$$

再将式(7)代入式(6)得:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{q_g B_g \mu_g}{2 \pi K h} \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{r_e^2} \right) \quad (8)$$

对式(8)积分,并代入上下限:

$$\int_{p_{wf}}^p dp = \frac{q_g B_g \mu_g}{2 \pi K h} \int_{r_w}^r \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{r_e^2} \right) dr \quad (9)$$

由式(9)积分得,定容封闭圆形气藏,拟稳定阶段的压力分布方程为:

$$p = p_{wf} + \frac{q_g B_g \mu_g}{2 \pi K h} \left(\ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2 r_e^2} \right) \quad (10)$$

压力分布的平均压力可表示为:

$$\bar{p} = \frac{\int_{r_w}^{r_e} p dV_p}{\int_{r_w}^{r_e} dV_p} \quad (11)$$

式中:

$$dV_p = 2 \pi r h \varphi dr \quad (12)$$

将式(10)和式(12)代入式(11)积分,并忽略 r_w 的影响得:

$$\bar{p} = p_{wf} + \frac{q_g B_g \mu_g}{2 \pi K h} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} \right) \quad (13)$$

当考虑气井为不完善井时,由式(13)得,拟稳定阶段气井的产量为^[5]:

$$q_g = \frac{2 \pi K h (\bar{p} - p_{wf})}{B_g \mu_g \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_t \right)} \quad (14)$$

式中:

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (15)$$

气体的体积系数表示为:

$$B_g = \frac{p_{sc} Z T}{p T_{sc}} \quad (16)$$

当取 $p = (\bar{p} + p_{wf})/2$,并将相应的 μ_g 和 Z 取为 \bar{p} 压

力下的 $\bar{\mu}_g$ 和 \bar{Z} 时,由式(16)得:

$$B_g = \frac{p_{sc}\bar{Z}T}{\left[\left(\bar{p} + p_{wf}\right)/2\right]T_{sc}} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)得:

$$q_g = \frac{\pi KhT_{sc}\left(\bar{p}^2 - p_{wf}^2\right)}{\bar{\mu}_g\bar{Z}T_{sc}\left(\ln\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_t\right)} \quad (18)$$

再将式(18)改写为式(19):

$$\bar{p}^2 - p_{wf}^2 = \frac{q_g\bar{\mu}_g\bar{Z}T_{sc}}{\pi KhT_{sc}}\left(\ln\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_t\right) \quad (19)$$

对于定容封闭气藏,拟稳定生产阶段的物质平衡方程式为^[6]:

$$G_p B_g = GB_{gi}C_t^*(p_i - \bar{p}) \quad (20)$$

式中:

$$C_t^* = \frac{C_t}{S_{gi}} = C_{gi} + \frac{C_w S_{wi} + C_f}{S_{gi}} \quad (21)$$

将式(20)等号两端同乘以 $(p_i + \bar{p})$ 得:

$$G_p B_g (p_i + \bar{p}) = GB_{gi}C_t^*(p_i^2 - \bar{p}^2) \quad (22)$$

在定容气藏投产的初期,由于 G_p 较小,地层压降较低,故可取: $\bar{p} \approx p_i$, $p_i + \bar{p} \approx 2p_i$ 和 $B_g \approx B_{gi}$ 的结果,因此,由式(22)得:

$$p_i^2 - \bar{p}^2 = \frac{2p_i G_p}{GC_t^*} \quad (23)$$

由式(19)减式(23)得,拟稳定阶段弹性二相法的新式为:

$$p_{wf}^2 = p_i^2 - \frac{q_g\bar{\mu}_g\bar{Z}T_{sc}}{\pi KhT_{sc}}\left(\ln\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_t\right) - \frac{2p_i}{GC_t^*}G_p \quad (24)$$

应当指出,上述的理论推导是以SI基础单位进行的(见符号注释),当改为SI矿场实用单位表示时,式(24)为:

$$p_{wf}^2 = p_i^2 - \frac{3.685 \times 10^4 q_g \bar{\mu}_g \bar{Z} T_{sc}}{KhT_{sc}}\left(\ln\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_t\right) - \frac{2p_i}{GC_t^*}G_p \quad (25)$$

若设:

$$\alpha = p_i^2 - \frac{3.685 \times 10^4 q_g \bar{\mu}_g \bar{Z} T_{sc}}{KhT_{sc}}\left(\ln\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_t\right) \quad (26)$$

$$\beta = \frac{2p_i}{GC_t^*} \quad (27)$$

则得:

$$p_{wf}^2 = \alpha - \beta G_p \quad (28)$$

由式(28)看出,对于定容封闭气藏,当气井的生产动态进入拟稳定阶段后,气井的 p_{wf}^2 与 G_p 成直线下降关系。由式(27)看出,直线的斜率 β 与 p_i 成正比,与 G 成反比。而 β 值的理论范围为 $0 < \beta < 1$,若对 p_{wf}^2 与 G_p 的直线关系数据进行线性回归,求得直线的斜率 β 数值后,再由式(27)改写的式(29)确定气井控制的原始地质储量为:

$$G = \frac{2p_i}{\beta C_t^*} \quad (29)$$

将式(29)中的 C_t^* 为总压缩系数改写为:

$$C_t^* = C_{gi} + C_e \quad (30)$$

式中:

$$C_e = \frac{C_w S_{wi} + C_f}{S_{gi}} \quad (31)$$

由于 $C_{gi} \gg C_e$ 可忽略其影响,因此,可将式(30)比较准确地写为:

$$C_t^* = C_{gi} \quad (32)$$

气体的原始压缩系数表示为:

$$C_{gi} = \frac{1}{p_i} - \frac{dZ}{Zdp} \quad (33)$$

由于 dZ/Zdp 的数值很小,可以忽略不计,因此,由式(33)可得:

$$C_{gi} = \frac{1}{p_i} \quad (34)$$

将式(34)代入式(32)得:

$$C_t^* = \frac{1}{p_i} \quad (35)$$

再将式(35)代入式(29)得,弹性二相法确定并控原始地质储量的新式为:

$$G = \frac{2p_i^2}{\beta} \quad (36)$$

应当指出,在式(25)中的 r_e 为垂直井的驱动半径,若改为水平井的拟驱动半径 r_{ep} 时,式(28)也适用于水平井的弹性二相法关系式,而水平井的拟驱动半径表示为^[7-8]:

$$r_{ep} = r_w^{(1-h/L)}\left(\frac{h}{2}\right)^{h/L}\left[\left(\frac{4a}{L} - 1\right)^2 - 1\right]^{0.5} \quad (37)$$

2 弹性二相法新式的应用实例

中国苏里格气田的苏5井,钻遇二叠系石盒子组低渗致密砂岩气藏,在射孔完井后,经人工水力压裂投产,此后关井测试的原始地层压力 $p_i=29.06$ MPa。地层及流体物性参数为: $K=1 \sim 2$ mD; $\varphi=0.097$; $S_{gi}=0.654$; $h=16.8$ m; $r_w=0.1$ m; $C_i^*=0.034$ 4 MPa⁻¹; $C_i=0.022$ 5 MPa⁻¹; $\mu_{gi}=0.022$ 4 mPa·s; $Z_i=0.962$; $r_g=0.66$; $T=378$ K; $T_{sc}=293$ K; $p_{sc}=0.101$ MPa。该井于2001年3月30日开始进行修正等时试井,接着以稳定产量 $q_g=10 \times 10^4$ m³/d连续进行了30 d的压降曲线测试,而后关井测试压力恢复曲线(见图1),所得的数据列于表1。

将表1的数据,按式(28)的关系绘于图2。由图2看出,在 $G_p > 100 \times 10^4$ m³时, p_{wf}^2 与 G_p 呈很好的直线下降关系,这表明苏5井的生产动态已进入拟稳定阶段。再将表1的数据绘于半对数坐标的图3上。由图3看出,这是一条前为直线,后为曲线的压降曲线。前者表示压降曲线的非稳定阶段,后者表示压降曲线的拟稳定阶段。对图2上直线段的数据进行线性回归求得,直线的截距 $\alpha=574.78$,直线的斜率 $\beta=0.689$ 2,相关系数 $R^2=0.998$ 9。将 β 和 p_i 的数值代入式(36)得,苏5井控制的原始地质储量为:

$$G = \frac{2p_i^2}{\beta} = \frac{2 \times 29.06^2}{0.6892} = 2450.62 \times 10^4 \text{ m}^3。$$

3 结论

对于预探井、详探井和开发井,在完井之后都要

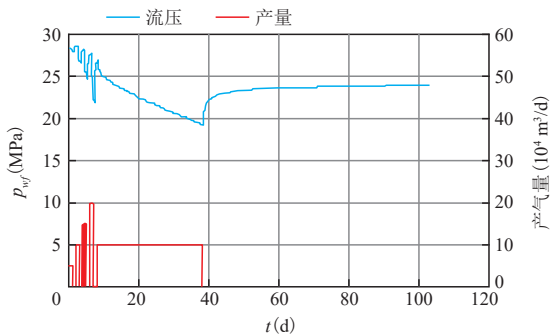


图1 苏5井完井后测试过程^[5]

Fig. 1 Testing process after well completion of Well Su 5^[5]

表1 苏5井压降曲线测试的数据表^[7,9]

Table 1 Data of pressure draw down test of Well Su 5^[7,9]

t (d)	G_p (10^4 m ³)	p_{wf} (MPa)	p_{wf}^2 (MPa ²)
0.045	0.446	26.722	714.049
0.111	1.113	26.007	676.385
0.139	1.388	25.913	671.489
0.183	1.833	25.819	666.605
0.228	2.279	25.703	660.649
0.283	2.833	25.602	655.483
0.345	3.446	25.561	653.380
0.395	3.946	25.495	649.975
0.505	5.054	25.373	643.804
0.639	6.388	25.335	641.847
0.833	8.333	25.233	636.704
1.100	11.000	25.148	632.397
1.522	15.221	24.977	623.846
1.800	18.000	24.913	620.643
2.278	22.779	24.705	610.332
2.889	28.888	24.511	600.789
3.916	39.158	24.187	584.992
5.229	52.288	23.816	567.188
6.790	67.896	23.452	550.010
8.345	83.454	23.166	536.668
10.873	108.729	22.538	507.979
13.998	139.979	21.921	480.530
16.623	166.229	21.481	461.453
19.304	193.038	21.013	441.534
22.165	221.646	20.528	421.411
24.568	245.675	20.093	403.717
28.206	282.063	19.504	380.390
30.037	300.371	19.212	369.097

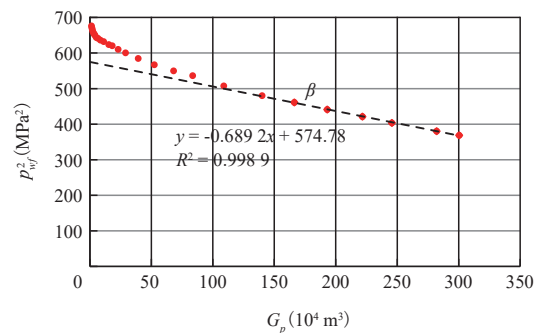


图2 弹性二相法 p_{wf}^2 与 G_p 的直角坐标关系图

Fig. 2 Rectangular coordinate relationship between p_{wf}^2 and G_p of elastic two-phase method

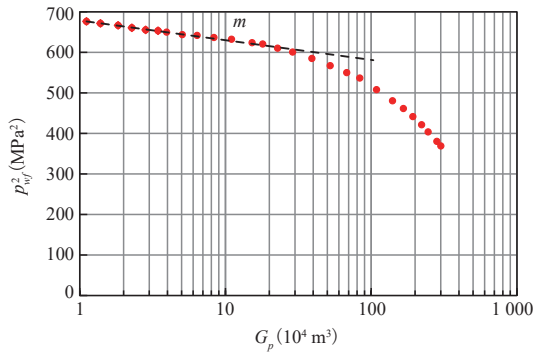


图3 弹性二相法 p_{wf}^2 与 G_p 的半对数坐标关系图
Fig. 3 Semi-logarithm coordinate relationship between p_{wf}^2 and G_p of elastic two-phase method

进行稳定的产能测试和不稳定的压降曲线与压力恢复曲线测试。前者可用于确定气井的绝对无阻流量和IPR曲线(流入动态曲线, Inflow Performance Relationship Curve);后者可用于确定气藏的原始地层压力、有效渗透率和表示完井效率的表皮系数,以及判定气井附近存在的边界性质和确定气井控制的原始地质储量。因此,在气井投产的初期进行稳定试井和不稳定试井的测试是一项重要的工作。其中压降曲线测试的拟稳定阶段,是利用弹性二相法评价气井控制原始地质储量的重要阶段。陈元千^[1]于1991年提出的拟稳定阶段弹性二相法,在我国评价复杂类型定容气藏的原始地质储量中得到了广泛的应用,并连续列入中华人民共和国石油天然气行业标准。该法在理论上要求气井的产量需要保持稳定,但若存在产量的波动时,会对评价的结果产生一定的影响。该文基于有限地层的扩散方程,对压降曲线拟稳定阶段进行了推导,得到了弹性二相法的新式。该新式应用简单,并能提高评价气井控制原始地质储量的可靠性。由式(29)看出,对于定容封闭气藏,气井控制的原始地质储量 G 与 p_i 成正比,与 β 成反比,这是得到的一个重要认识。

符号注释

(括号内为SI基础单位)

- r ——径向半径, m, (m);
- r_e ——垂直井的驱动半径, m, (m);
- r_{ep} ——水平井的拟驱动半径, m, (m);
- r_w ——垂直井或水平井的井底半径, m, (m);
- L ——水平井段的长度, m, (m);
- a ——椭圆形长轴的半长, m, (m);

- a_1 ——变产量压力平方拟稳定阶段直线的截距, $\text{MPa}^2/(10^4 \text{m}^3/\text{d}), (\text{Pa}^2/(\text{m}^3/\text{s}))$;
- a_2 ——变产量拟压力法拟稳定阶段直线的截距, $\text{MPa}^2/(10^4 \text{m}^3/\text{d}), (\text{Pa}^2/(\text{m}^3/\text{s}))$;
- p ——压力, MPa, (Pa);
- p_i ——原始地层压力, MPa, (Pa);
- p_{wf} ——井底流压, MPa, (Pa);
- \bar{p} ——拟稳定阶段驱动半径内的平均压力, MPa, (Pa);
- p_{sc} ——地面标准压力, MPa, (Pa);
- $\psi(p_i)$ —— p_i 压力下的拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s}), (\text{Pa}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s}))$;
- $\psi(p_{wf})$ —— p_{wf} 压力下的拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s}), (\text{Pa}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s}))$;
- K ——有效渗透率, mD, (m^2);
- φ ——有效孔隙度, frac, (frac);
- h ——有效厚度, m, (m);
- μ_g ——地层气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}, (\text{Pa}\cdot\text{s})$;
- $\bar{\mu}_g$ ——在 \bar{p} 下气体的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}, (\text{Pa}\cdot\text{s})$;
- μ_{gi} ——在 p_i 下气体的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}, (\text{Pa}\cdot\text{s})$;
- C_t ——总压缩系数, $\text{MPa}^{-1}, (\text{Pa}^{-1})$;
- C_t^* ——总压缩系数($C_t^*=C/S_{gi}$), $\text{MPa}^{-1}, (\text{Pa}^{-1})$;
- C_{gi} ——在 p_i 下的气体压缩系数, $\text{MPa}^{-1}, (\text{Pa}^{-1})$;
- C_w ——气藏束缚水的压缩系数, $\text{MPa}^{-1}, (\text{Pa}^{-1})$;
- C_f ——气藏岩石的有效压缩系数, $\text{MPa}^{-1}, (\text{Pa}^{-1})$;
- C_e ——气藏岩石和束缚水的有效压缩系数, $\text{MPa}^{-1}, (\text{Pa}^{-1})$;
- C_A ——Diets(狄茨)形状系数, dim, (dim);
- A ——气井控制的面积, $\text{m}^2, (\text{m}^2)$;
- S_{gi} ——原始含气饱和度, frac, (frac);
- S_{wi} ——束缚水的饱和度, frac, (frac);
- S_t ——总表皮系数, dim, (dim);
- S_1 ——打开程度不完善引起的表皮系数, dim, (dim);
- S_2 ——射孔密度不完善引起的表皮系数, dim, (dim);
- S_3 ——钻井、完井和压裂泥浆液污染引起的表皮系数, dim, (dim);
- S_4 ——高速窜流引起的表皮系数, dim, (dim);
- q_g ——气井的稳定产量, $10^4 \text{m}^3/\text{d}, (\text{m}^3/\text{s})$;
- $q_g(t)$ ——气井的变产量, $10^4 \text{m}^3/\text{d}, (\text{m}^3/\text{s})$;
- B_g ——在 p 压力下气体的体积系数, dim, (dim);

B_{gi} ——在 p_i 压力下气体的体积系数, dim, (dim);

b_1 ——变产量压力平方法拟稳定阶段直线的斜率;

b_2 ——变产量拟压力法拟稳定阶段直线的斜率;

Z_i ——在 p_i 压力下的气体偏差系数, dim, (dim);

Z ——在 p 压力下的气体偏差系数, dim, (dim);

\bar{Z} ——在 \bar{p} 下的气体偏差系数, dim, (dim);

T ——气藏的温度, K, (K);

T_{sc} ——地面标准温度, K, (K);

t ——生产时间, d, (s);

G_p ——累积产气量, 10^4 m^3 , (m^3);

G ——原始地质储量, 10^4 m^3 , (m^3);

g_g ——气体的相对密度 ($g_{\text{air}}=1$), dim, (dim);

α ——本文拟稳定阶段新式直线段的截距;

β ——本文拟稳定阶段新式直线段的斜率;

R^2 ——相关系数。

参考文献

- [1] 陈元千: 油气藏工程计算方法(续篇), 石油工业出版社, 北京, 1991, 37-47。
Chen Yuanqian: Petroleum reservoir engineering calculation methods (Continuation), Petroleum Industry Press, Beijing, 1991, 37-47.
- [2] 陈元千: 现代油藏工程(第2版), 石油工业出版社, 北京, 2020, 254-259, 303-304。
Chen Yuanqian: Modern petroleum reservoir engineering (Second Edition), Petroleum Industry Press, Beijing, 2020, 254-259, 303-304.
- [3] Dake, L. P.: Fundamentals of reservoir engineering, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1978, 141-145.
- [4] Craft, B. C. and Hawkins, M. F.: Applied petroleum reservoir engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1959, 309-314.
- [5] 陈元千: 油气藏工程实践, 石油工业出版社, 北京, 2005, 167-175, 260-269。
Chen Yuanqian: The practice of petroleum engineering, Petroleum Industry Press, Beijing, 2005, 167-175, 260-269.
- [6] 陈元千: 油气藏工程实用方法, 石油工业出版社, 北京, 1999, 263-277。
Chen Yuanqian: Practical methods of petroleum reservoir engineering, Petroleum Industry Press, Beijing, 1999, 263-277.
- [7] 彭仕宓, 陈元千: 实用油气田开发地质与油藏工程方法, 石油工业出版社, 北京, 2013, 276-282, 398-405。
Peng Shimi, Chen Yuanqian: Practical petroleum development geology and reservoir engineering method, Petroleum Industry Press, Beijing, 2013, 276-282, 398-405.
- [8] 陈元千: 油气藏工程论文集(2013—2018), 石油工业出版社, 北京, 2019, 261-268。
Chen Yuanqian: Article collection of petroleum Reservoir engineering (2013—2018), Petroleum Industry Press, Beijing, 2019, 261-268.
- [9] 陈元千: 评价气藏原始地质储量和原始可采储量的动态法——为修订《SY/T 6098—2010》标准而作, 天然气勘探与开发, 2021, 44(1)1-12。
Chen Yuanqian: Dynamic methods for estimating initial gas in-place and initial recoverable reserves in gas reservoirs: For the revised 《SY/T 6098—2010》, Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44(1)1-12.

附录 A

(变产量的弹性二相法)

对于一口关闭状态的新井, 开井进行测试井底流动压力下降的曲线, 又简称为压降曲线。当气井的产量不能保持稳定时, 则需要利用变产量的弹性二相法, 评价气井控制的原始地质储量。以下为由压力平方和拟压力分别表示的拟稳定阶段的弹性二相法关系式。

1) 压力平方表示的弹性二相法^[1,2]:

$$\frac{p_i^2 - p_{wf}^2}{q_g(t)} = a_1 + b_1 t \quad (\text{A-1})$$

式中:

$$a_1 = \frac{4.24 \times 10^4 \bar{\mu}_g \bar{Z} T p_{sc}}{Kh T_{sc}} \left(\log \frac{A}{C_A r_w^2} + 0.351 + 0.87 S_i \right) \quad (\text{A-2})$$

$$b_1 = \frac{8.33 \times 10^{-2} p_i}{GC_i^*} = \frac{8.33 \times 10^{-2} p_i^2}{G} \quad (\text{A-3})$$

$$G = 8.33 \times 10^{-2} p_i^2 / b_1 \quad (\text{A-4})$$

2) 拟压力表示的弹性二相法^[1,2]:

$$\frac{\psi(p_i) - \psi(p_{wf})}{q_g(t)} = a_2 + b_2 t \quad (\text{A-5})$$

式中:

$$\psi(p_i) - \psi(p_{wf}) = 2 \int_0^{p_i} \frac{p}{\mu_g Z} dp - 2 \int_0^{p_{wf}} \frac{p}{\mu_g Z} dp \quad (\text{A-6})$$

$$a_2 = \frac{4.24 \times 10^4 p_{sc} T}{Kh T_{sc}} \left(\log \frac{A}{C_A r_w^2} + 0.351 + 0.87 S_i \right) \quad (\text{A-7})$$

$$b_2 = \frac{8.33 \times 10^{-2} p_i}{GC_i^* \bar{\mu}_g \bar{Z}} = \frac{8.33 \times 10^{-2} p_i^2}{G \bar{\mu}_g \bar{Z}} \quad (\text{A-8})$$

$$G = \frac{8.33 \times 10^{-2} p_i^2}{b_2 \bar{\mu}_g \bar{Z}} \quad (\text{A-9})$$

注释: 上述各式符号的单位均为 SI 制实用单位, 但 t 的单位为 h。

(编辑 顾丽媛)