

引用格式: 陈元千, 刘洋. 气井拟压力弹性二相法的推导、简化及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 317-323.

CHEN Yuanqian, LIU Yang. Derivation, simplification and application for pseudo-pressure elastic two-phase method of gas wells[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 317-323.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.001

气井拟压力弹性二相法的推导、简化及应用

陈元千, 刘洋

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 弹性二相法是评价气井控制原始地质储量的动态法, 又称为拟稳态法(pseudo-steady-state method)或气藏范围测试法(reservoir limit testing method)。该法主要用于气井初期测试, 评价岩性、断块和裂缝类型气藏井控的原始地质储量。由压力平方表示的弹性二相法, 在中国从1994年起, 连续4次被列入国家油气行业标准(SY/T 6098—1994, SY/T 6098—2000, SY/T 6098—2010, SY/T 6098—2022)。与拟压力表示的弹性二相法相比, 由压力平方表示的弹性二相法是一种较好的近似评价方法。利用AL-HUSSAINY(1966)指出的拟压力关系式, 经理论推导, 得到了拟压力的弹性二相法, 并应用WATTENBARGER(1968)对 $\mu_g Z$ 随 p 的变化关系研究, 对拟压力弹性二相法进行了简化, 分别得到了由压力一次方和压力平方表示的弹性二相法。目前, 在国内外的文献中, 尚看不到有关拟压力弹性二相法推导的报道。通过实例应用表明, 压力一次方表示的弹性二相法评价的井控原始地质储量明显偏低, 而由压力平方表示的弹性二相法评价的结果明显偏高。

关键词: 气井; 拟压力; 压力一次方; 压力平方; 弹性二相法; 推导; 简化; 应用

中图分类号: TE341

文献标识码: A

Derivation, simplification and application for pseudo-pressure elastic two-phase method of gas wells

CHEN Yuanqian, LIU Yang

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

Abstract: The elastic two-phase method, also known as the pseudo-steady-state method or reservoir limit testing method, is a pivotal dynamic technique for estimating the original gas in place (OGIP) in well-controlled scenarios. This method is primarily employed in the initial testing of gas wells and for the OGIP assessment in varied lithologies, fault blocks, and fracture types of gas reservoirs. Since 1994, the pressure squared variant of this method has been recognized in the Chinese national oil and gas industry standards across four editions: SY/T 6098—1994, SY/T 6098—2000, SY/T 6098—2010, SY/T 6098—2022. This method, based on the pressure squared calculation, offers a robust approximation compared to its pseudo-pressure counterpart. The theoretical derivation of the elastic two-phase equation for pseudo-pressure, originally proposed by AL-HUSSAINY (1966), and further simplified using WATTENBARGER's (1968) study on the relationship between $\mu_g Z$ and p , allows for representations using both pressure to the first and second powers. Notably, while the pressure to the first power method tends to under-estimate OGIP, the pressure squared method is inclined to over-estimate, as evidenced by practical applications. Currently, there is a lack of substantial literature on the pseudo-pressure elastic two-phase method both domestically and internationally.

Keywords: gas well; pseudo-pressure; pressure one power; pressure squared; elastic two-phase method; derivation; simplification; application

收稿日期: 2023-07-25。

第一作者简介: 陈元千(1933—), 男, 教授级高级工程师, 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: 北京市学院路20号中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: liuyoung0926@qq.com

陈元千^[1]指出的气井压力平方表示的弹性二相法,在国内受到普遍的关注,1994—2022年,连续四次被列入国家油气行业标准^[2-5]。从理论上讲,利用拟压力表示气体在多孔介质中的流动更为准确可靠。但在目前国内外文献中,尚看不到利用拟压力对气井弹性二相法推导的报道。例如,由加拿大的 Energy Resources Conservation Board^[6]所著的 *Theory and Practice of the Testing of Gas Wells* 和 CHAUDHRY^[7]所著 *Gas Well Testing Handbook* 中所提供的拟压力弹性二相法公式,以及由 EARLOUGHER^[8]所著的 *Advances in Well Test Analysis* 以及 LEE 和 WATTENBARGER^[9]所著的 *Gas Reservoir Engineering* 中所提供的压力一次方的弹性二相法公式均没有理论上的完整推导,仅给出了一个不正确的结果。利用 AL-HUSSAINY^[10]提出的拟压力表达式,经理论上的推导得到了拟压力弹性二相法的关系式,并利用 WATTENBARGER^[11]有关气体黏度与气体偏差系数乘积,随压力变化特征的研究成果,对拟压力弹性二相法进行了简化,得到了由压力一次方和压力平方表示的弹性二相法关系式。

1 拟压力弹性二相法的推导

对于真实气体通过孔隙介质流动的研究,由 AL-HUSSAINY^[10]提出的拟压力表示为:

$$\psi(p) = 2 \int_{p_w}^p \frac{p}{\mu_g Z} dp \quad (1)$$

由达西定律表示的气体平面径向流微分式为:

$$q_g = \frac{A k dp}{B_g \mu_g dr} \quad (2)$$

不同径向半径位置的渗流面积为:

$$A = 2\pi r h \quad (3)$$

不同径向半径位置 p 压力下气体的体积系数为:

$$B_g = \frac{p_{sc} Z T}{p T_{sc}} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2)得:

$$q_g = \frac{2\pi r h k T_{sc} p dp}{p_{sc} T \mu_g Z dr} \quad (5)$$

对式(5)分离变量,代入上下限积分为:

$$q_g \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r} = \frac{\pi k h T_{sc}}{p_{sc} T} \int_{p_{wf}}^{p_e} 2 \frac{p}{\mu_g Z} dp \quad (6)$$

由式(6)积分,并考虑式(1)拟压力的函数关系得:

$$q_g \ln \frac{r_e}{r_w} = \frac{\pi k h T_{sc}}{p_{sc} T} \left(2 \int_{p_w}^{p_e} \frac{p}{\mu_g Z} dp - 2 \int_{p_w}^{p_{wf}} \frac{p}{\mu_g Z} dp \right) \quad (7)$$

若将驱动边界的压力 p_e , 改为平均压力 \bar{p} 表示, 并考虑为非完善井的总表皮系数时, 则式(7)可写为:

$$q_g \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_i \right) = \frac{\pi k h T_{sc}}{p_{sc} T} \left(2 \int_{p_w}^{\bar{p}} \frac{p}{\mu_g Z} dp - 2 \int_{p_w}^{p_{wf}} \frac{p}{\mu_g Z} dp \right) \quad (8)$$

将式(8)改为拟压力表示的压降为:

$$\psi(\bar{p}) - \psi(p_{wf}) = \frac{q_g p_{sc} T}{\pi k h T_{sc}} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_i \right) \quad (9)$$

再将式(9)改为下式:

$$\psi(\bar{p}) - \psi(p_{wf}) = \frac{q_g p_{sc} T}{2\pi k h T_{sc}} \left(\ln \frac{r_e^2}{r_w^2} - \frac{3}{2} + 2S_i \right) \quad (10)$$

最后,将式(10)变换为下式:

$$\psi(\bar{p}) - \psi(p_{wf}) = \frac{q_g p_{sc} T}{2\pi k h T_{sc}} \left(\ln \frac{4\pi r_e^2}{4\pi r_w^2 e^{3/2} e^{-2S_i}} \right) \quad (11)$$

考虑到如下关系: $A = \pi r_e^2$; $4\pi e^{3/2} = 56.31 = 1.781 \times 32.62$; $C_A = 31.62$ (圆形边界井处中心的 Dietz 常数), 则由式(11)可得:

$$\psi(\bar{p}) - \psi(p_{wf}) = \frac{q_g p_{sc} T}{2\pi k h T_{sc}} \left(\ln \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (12)$$

式(12)中:

$$r_{we}^2 = r_w^2 e^{-2S_i} \quad (13)$$

对于不同封闭边界形状和井处于不同位置的气藏, 依靠气体、岩石和束缚水随压降的累积膨胀的物质平衡方程为^[12]:

$$G_p B_g = G B_{gi} C_{ti}^* (p_i - p) \quad (14)$$

式(14)中:

$$B_{gi} = \frac{p_{sc} Z_i T}{p_i T_{sc}} \quad (15)$$

$$C_{ti}^* = G_{gi} + \frac{C_{wi} + S_{wi} + C_f}{S_{gi}} \quad (16)$$

对式(14)微分得:

$$q_g dt B_g = G B_{gi} C_{ti}^* (-dp) \quad (17)$$

将式(4)代入式(17)得:

$$q_g dt = \frac{G B_{gi} C_{ti}^* T_{sc}}{p_{sc} T} \left(-\frac{p}{Z} dp \right) \quad (18)$$

再将式(18)等号右边的分子和分母同时乘以 $2\mu_g$ 得:

$$q_g dt = \frac{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}}{2p_{sc}T} \left(-2 \frac{p}{\mu_g Z} dp \right) \quad (19)$$

对于气井的初期测试,由于地层气体黏度随压力的变化较小,故可以写出 $\mu_g = \mu_{gi}$,于是可将式(19)写为:

$$q_g dt = \frac{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}}{2p_{sc}T} \left(-2 \frac{p}{\mu_g Z} dp \right) \quad (20)$$

对式(20)积分,代入上下限为:

$$q_g \int_0^t dt = \frac{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}}{2p_{sc}T} \left(-2 \int_{p_i}^{\bar{p}} \frac{p}{\mu_g Z} dp \right) \quad (21)$$

由式(21)积分后,写为:

$$q_g t = \frac{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}}{2p_{sc}T} \left(2 \int_{p_{wf}}^{p_i} \frac{p}{\mu_g Z} dp - 2 \int_{p_{wf}}^{\bar{p}} \frac{p}{\mu_g Z} dp \right) \quad (22)$$

将式(1)的关系代入式(22)得,气井的拟压力降为:

$$\psi(p_i) - \psi(\bar{p}) = \frac{2q_g p_{sc} T t}{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}} \quad (23)$$

由式(12)和式(23)相加得,拟压力表示的定产量弹性二相法为:

$$\psi(p_i) - \psi(p_{wf}) = \frac{q_g p_{sc} T}{2\pi k h T_{sc}} \left(\ln \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) + \frac{2q_g p_{sc} T t}{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}} \quad (24)$$

2 拟压力弹性二相法的单位变换及简化

应当指出,上述的推导及所得到的式(24),所用参数的单位均为SI基础单位(见符号注释)。将式(24)由SI基础单位变换为SI矿场实用单位(见符号注释)的具体方法为^[13]:

$$\left[\psi(p_i) - \psi(p_{wf}) \right] \left(\frac{10^{12}}{10^{-3}} \right) = \frac{q_g \left(\frac{10^4}{86400} \right) p_{sc} (10^6) T}{2\pi k (10^{-15}) h T_{sc}} \times \quad (2.303) \left(\log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) + \frac{2q_g \left(\frac{10^4}{86400} \right) p_{sc} (10^6) T t (3600)}{G (10^4) B_{gi} C_{ti}^* (10^6) T_{sc} \mu_{gi} (10^{-3})} \quad (25)$$

对式(25)化简整理后得,由SI矿场实用单位表示的拟压力弹性二相法为:

$$\Delta\psi(p) = \frac{4.24 \times 10^4 q_g p_{sc} T}{kh T_{sc}} \left(\log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) + \frac{8.334 \times 10^{-2} q_g p_{sc} T t}{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}} \quad (26)$$

若设:

$$\alpha_p = \frac{4.24 \times 10^4 q_g p_{sc} T}{kh T_{sc}} \left(\log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (27)$$

$$\beta_p = \frac{8.334 \times 10^{-2} q_g p_{sc} T}{GB_{gi}C_{ti}^*T_{sc}\mu_{gi}} \quad (28)$$

则得:

$$\Delta\psi(p) = \alpha_p + \beta_p t \quad (29)$$

式中:

$$\Delta\psi(p) = \psi(p_i) - \psi(p_{wf}) \quad (30)$$

由式(29)看出, $\Delta\psi(p)$ 与 t 之间是一条截距为 α_p 和斜率为 β_p 的直线。根据实际数据,按照式(29)关系进行线性回归,可以求得 α_p 和 β_p 的数值。此后,再由式(28)改写式(31),确定井控的原始地质储量:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} q_g p_{sc} T}{\beta_p B_{gi} C_{ti}^* T_{sc} \mu_{gi}} \quad (31)$$

根据 WATTENBARGER^[11]对拟压力研究表明,当压力 $p > 3000$ psia (20.684 MPa)时, $\mu_g Z$ 随 p 呈直线增加,直线的斜率 $\mu_g Z/p$ 等于常数,可取 $p/\mu_g Z = p_i/\mu_{gi} Z_i$,考虑式(1)表示的拟压力,由式(30)可写得式(32):

$$\Delta\psi(p) = \frac{2p_i}{\mu_{gi} Z_i} \int_{p_{wf}}^{p_i} dp = \frac{2p_i (p_i - p_{wf})}{\mu_{gi} Z_i} = \frac{2p_i \Delta p}{\mu_{gi} Z_i} \quad (32)$$

将式(15)和式(32)代入式(26)得,由压力一次方表示的弹性二相法为:

$$\Delta p = \frac{2.12 \times 10^4 q_g B_{gi} \mu_{gi}}{kh} \left(\log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) + \frac{4.167 \times 10^{-2} q_g t}{GC_{ti}^*} \quad (33)$$

若设:

$$\alpha_1 = \frac{2.12 \times 10^4 q_g B_{gi} \mu_{gi}}{kh} \left(\log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (34)$$

$$\beta_1 = \frac{4.167 \times 10^{-2} q_g}{GC_{ti}^*} \quad (35)$$

则得:

$$\Delta p = \alpha_1 + \beta_1 t \quad (36)$$

式中:

$$\Delta p = p_i - p_{wf} \quad (37)$$

由式(36)看出, Δp 与 t 之间是一个截距为 α_1 和斜率为 β_1 的直线关系。根据实际测试的 Δp 与 t 的相应数据,经线性回归求得 α_1 和 β_1 的数值后,由式(35)改写的式(38)可得,由压力一次方弹性二相法,确定井控原始地质储量的关系式为:

$$G = \frac{4.167 \times 10^{-2} q_g}{\beta_1 C_{ii}^*} \quad (38)$$

根据 WATTENBARGER^[11] 的研究表明,当压力 $p < 2\,000$ psia (13.789 MPa) 时, $\mu_g Z$ 几乎随压力等于常数,因此,可得 $\mu_g Z = \mu_{gi} Z_i$ 关系。此时,由式(30)可得式(39):

$$\Delta \psi(p) = \frac{2}{\mu_{gi} Z_i} \int_{p_{wf}}^{p_i} p dp = \frac{(p_i^2 - p_{wf}^2)}{\mu_{gi} Z_i} = \frac{\Delta p^2}{\mu_{gi} Z_i} \quad (39)$$

将式(39)代入式(26)得,由压力平方表示的弹性二相法关系式为:

$$\Delta p^2 = \frac{4.24 \times 10^4 q_g \mu_{gi} Z_i p_{sc} T}{kh T_{sc}} \left(\log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) + \frac{8.334 \times 10^{-2} q_g p_i t}{GC_{ii}^*} \quad (40)$$

若设:

$$\alpha_2 = \frac{4.24 \times 10^4 q_g \mu_{gi} Z_i p_{sc} T}{kh T_{sc}} \left(\log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (41)$$

$$\beta_2 = \frac{8.334 \times 10^{-2} q_g p_i}{GC_{ii}^*} \quad (42)$$

则得:

$$\Delta p^2 = \alpha_2 + \beta_2 t \quad (43)$$

式中:

$$\Delta p^2 = p_i^2 - p_{wf}^2 \quad (44)$$

由式(43)看出, Δp^2 与 t 之间是一个截距为 α_2 和斜率为 β_2 的直线关系。根据实测的 Δp^2 与 t 的相应数据,经线性回归可得 α_1 和 β_1 的数值,并由式(42)改写的式(45),确定井控的原始地质储量:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} q_g p_i}{\beta_2 C_{ii}^*} \quad (45)$$

3 方法应用实例

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,原始地层压力拟压力 $\psi(p_i) = 48\,893.39$ MPa²/(mPa·s)。地层及流体物性参数为: $\varphi = 0.097$ frac; $S_{gr} = 0.654$ frac; $h = 16.8$ m; $r_w = 0.1$ m; $C_{ii}^* = 0.034\,4$ MPa⁻¹; $C_{ti} = 0.022\,5$ MPa⁻¹; $\gamma_g = 0.66$ dim; $\mu_{gi} = 0.022\,4$ mPa·s; $B_{gi} = 0.004\,23$ dim; $Z_i = 0.942\,3$; $T = 378$ K; $T_{sc} = 293$ K; $T_{pc} = 208.82$ K; $T_{pr} = 1.81$ dim; $p_{sc} = 0.101$ MPa; $p_{pc} = 4.61$ MPa。在图1上绘出了苏5井的 $\psi(p)$ 与 p 的关系图,当 $p > 18$ MPa 时,可用式(46)表示:

$$\psi(p) = 2\,531.5p - 24\,672 \quad (46)$$

苏5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 连续进行压降曲线测试30 d,测试数据和有关的计算数据列于表1。

根据式(29)、式(36)和式(43)的关系,利用表1上的数据绘成了拟压力、压力一次方和压力平方弹性二相法关系图(图2—图4)。由图2至图4直线的线性回归,求得3种压力方式的直线截距、斜率和相关系数值列于表2。

将已知的各参数值代入式(31)得,由拟压力法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} \times 10 \times 0.101 \times 378}{18.206 \times 0.034\,4 \times 0.004\,23 \times 0.022\,4 \times 293} = 1\,830 \times 10^4 \text{ m}^3$$

再将已知的各参数值代入式(38)得,由压力一次方法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{4.167 \times 10^{-2} \times 10}{0.007\,2 \times 0.034\,4} = 1\,682 \times 10^4 \text{ m}^3$$

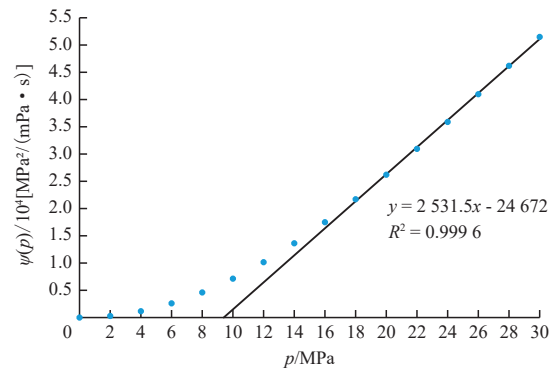


图1 苏5井 $\psi(p)$ 与 p 的关系图

Fig. 1 The plot of $\psi(p)$ vs. p of Well-Su-5

表1 苏5井测试和计算的数据表
Table 1 Testing and calculation data of Well-Su-5

t/h	P_{wf}/MPa	$\Delta p/MPa$	P_{wf}^2/MPa^2	$\Delta p^2/MPa^2$	$\psi(P_{wf})/[MPa^2/(mPa \cdot s)]$	$\Delta\psi(p)/[MPa^2/(mPa \cdot s)]$
1.080	26.722	2.338	714.065 3	130.418 3	42 974.743 0	5 918.647 0
2.664	26.007	3.053	676.364 0	168.119 6	41 164.720 5	7 728.669 5
3.336	25.913	3.147	671.483 6	173.000 0	40 926.759 5	7 966.630 5
4.392	25.819	3.241	666.620 8	177.862 8	40 688.798 5	8 204.591 5
5.472	25.703	3.357	660.644 2	183.839 4	40 395.144 5	8 498.245 5
6.792	25.602	3.458	655.462 4	189.021 2	40 139.463 0	8 753.927 0
8.280	25.561	3.499	653.364 7	191.118 9	40 035.671 5	8 857.718 5
9.480	25.495	3.565	649.995 0	194.488 6	39 868.592 5	9 024.797 5
12.120	25.373	3.687	643.789 1	200.694 5	39 559.749 5	9 333.640 5
15.336	25.335	3.725	641.862 2	202.621 4	39 463.552 5	9 429.837 5
19.992	25.233	3.827	636.704 3	207.779 3	39 205.339 5	9 688.050 5
26.400	25.148	3.912	632.421 9	212.061 7	38 990.162 0	9 903.228 0
36.528	24.977	4.083	623.850 5	220.633 1	38 557.275 5	10 336.114 5
43.200	24.913	4.147	620.657 6	223.826 0	38 395.259 5	10 498.130 5
54.672	24.705	4.355	610.337 0	234.146 6	37 868.707 5	11 024.682 5
69.336	24.511	4.549	600.789 1	243.694 5	37 377.596 5	11 515.793 5
93.984	24.187	4.873	585.011 0	259.472 6	36 557.390 5	12 335.999 5
125.496	23.816	5.244	567.201 9	277.281 7	35 618.204 0	13 275.186 0
162.960	23.452	5.608	549.996 3	294.487 3	34 696.738 0	14 196.652 0
200.280	23.166	5.894	536.663 6	307.820 0	33 972.729 0	14 920.661 0
260.952	22.538	6.522	507.961 4	336.522 2	32 382.947 0	16 510.443 0
335.952	21.921	7.139	480.530 2	363.953 4	30 821.011 5	18 072.378 5
398.952	21.481	7.579	461.433 4	383.050 2	29 707.151 5	19 186.238 5
463.296	21.013	8.047	441.546 2	402.937 4	28 522.409 5	20 370.980 5
531.960	20.528	8.532	421.398 8	423.084 8	27 294.632 0	21 598.758 0
589.632	20.093	8.967	403.728 6	440.755 0	26 193.429 5	22 699.960 5
676.944	19.504	9.556	380.406 0	464.077 6	24 702.376 0	24 191.014 0
720.888	19.212	9.848	369.100 9	475.382 7	23 963.178 0	24 930.212 0

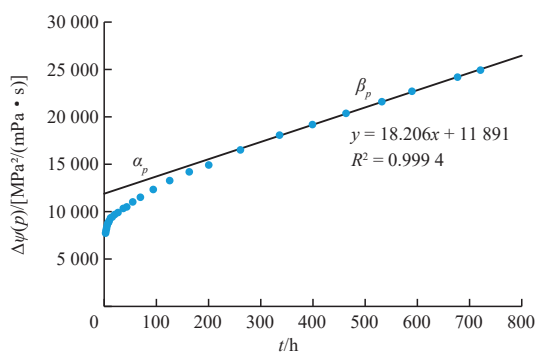


图2 $\Delta\psi(p)$ 与 t 的关系图
Fig. 2 Plot of $\Delta\psi(p)$ vs. t

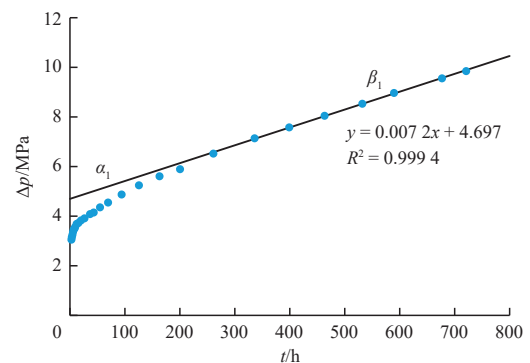
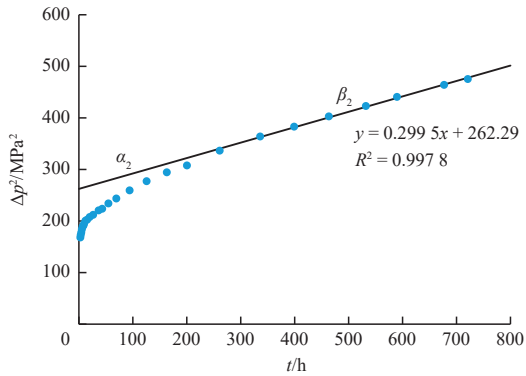


图3 Δp 与 t 的关系图
Fig. 3 Plot of Δp vs. t

图4 Δp^2 与 t 的关系图Fig. 4 Plot of Δp^2 vs. t 表2 不同压力方式的 α 、 β 和 R^2 值Table 2 The values of α , β and R^2 for under different pressure methods

方法	截距, α	斜率, β	相关系数, R^2
拟压力	11 891	18.206	0.999 4
压力一次方	4.697	0.007 2	0.999 4
压力平方	262.29	0.299 5	0.997 8

最后,将已知的各参数值代入式(45)得,由压力平方法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} \times 10 \times 29.06}{0.2995 \times 0.0344} = 2.351 \times 10^4 \text{ m}^3$$

由上述计算的结果可以看出,3种压力方式评价的井控原始地质储量,拟压力法居中,压力一次方法偏低,压力平方法偏高。

4 结论

利用AL-HUSSAINY^[10]提出的拟压力关系式,对气井的压降曲线的拟稳态方程进行了推导,得到了拟压力表示的弹性二相法关系式。国外学者称此为“Reservoir Limit Testing”(国内译名为探边测试)。该法可用于评价定容的岩性、断块和裂缝类型气藏井控的原始地质储量。陈元千^[1]于1991年提出的压力平方的弹性二相法,受到国内的普遍重视,被连续4

次列入国家油气行业的国标。由于计算技术的发展,国内外专家非常重视拟压力弹性二相法的应用。然而,迄今为止,在国内外的书刊文献中,尚看不到有关拟压力弹性二相法的推导报道。利用WATTENBARGER^[11]对气体黏度与气体偏差系数的乘积($\mu_g Z$)随压力 p 变化关系的研究,得到在压力 $p > 2\,000$ psia(即18 MPa)时,拟压力可用压力一次方表示,以及在压力 $p < 2\,000$ psia(即18 MPa)时,拟压力可用压力平方表示的结论。由拟压力表示的弹性二相法,经简化分别可得压力一次方和压力平方表示的弹性二相法。通过实例应用表明,拟压力法评价的井控原始地质储量居中,压力一次方法评价的结果明显偏低,压力平方法评价的结果明显偏高,因此,在实际应用中,应尽量采用拟压力法。然而,对异常高压气藏,应用压力一次方法可以得到比较满意的评价结果。

符号注释

(括号内为SI基础单位)

- q_g ——气井的稳定产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, (m^3/s);
- p ——压力, MPa, (Pa);
- p_b ——拟压力积分下限的基准压力(可取为0), MPa, (Pa);
- p_i ——原始地层压力, MPa, (Pa);
- p_{wf} ——井底流压, MPa, (Pa);
- \bar{p} ——平均压力, MPa, (Pa);
- p^2 ——压力平方, MPa^2 , (Pa^2);
- p_{pc} ——气体的拟临界压力, MPa, (Pa^2);
- p_{pr} ——气体的拟对比压力, dim, (dim);
- p_{sc} ——地面标准压力(0.101), MPa, (Pa^2);
- k ——气层有效渗透率, mD, (m^2);
- $\psi(p)$ —— p 压力下的拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$, ($\text{Pa}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$);
- $\psi(p_i)$ —— 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, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$, ($\text{Pa}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$);

$\psi(\bar{p})$ —— \bar{p} 压力下的拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$,
($\text{Pa}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$);
 μ_g —— p 压力下的气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$, ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);
 μ_{gi} —— p_i 压力下的气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$, ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);
 Z —— p 压力下的气体偏差系数, dim , (dim);
 Z_i —— p_i 压力下的气体偏差系数, dim , (dim);
 B_g —— p 压力下的气体体积系数, dim , (dim);
 B_{gi} —— p_i 压力下的气体原始体积系数, dim , (dim);
 γ_g ——气体的相对密度, dim , (dim);
 T ——气藏地层温度, K , (K);
 T_{sc} ——地面标准温度, K , (K);
 T_{pc} ——气体的拟临界温度, K ;
 T_{pr} ——气体的拟对比温度, dim , (dim);
 t ——气井的生产时间, h , (s);
 r ——距井底的径向距离, m , (m);
 r_w ——气井的井底半径, m , (m);
 r_e ——气井的驱动半径, m , (m);
 r_{we} ——有效井底半径, 见式(13), m , (m);
 S_i ——气井的总表皮系数 ($S_i = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$),
 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 ——钻井与完井不完善引起的表皮系数, dim ,
(dim);
 S_4 ——高速湍流引起的表皮系数, dim , (dim);
 S_{wi} ——地层束缚水饱和度, frac , (frac);
 S_{gi} ——地层原始含气饱和度, frac , (frac);
 A ——气井平面径向流的渗流面积, 或气井的驱动面
积, m^2 , (m^2);
 C_A ——Dietz 形状因子, dim , (dim);
 C_f ——地层岩石有效空隙压缩系数, MPa^{-1} , (Pa^{-1});
 C_{gi} ——气体的原始压缩系数, MPa^{-1} , (Pa^{-1});
 C_{wi} ——地层束缚水的压缩系数, MPa^{-1} , (Pa^{-1});
 C_{ii}^* ——气藏的总压缩系数, 见式(16), MPa^{-1} , (Pa^{-1});
 C_{ii} ——气藏的总压缩系数 ($C_{ii} = C_{ii}^* \times S_{gi}$), MPa^{-1} ,

(Pa^{-1});
 G ——气井控制的原始地质储量, 10^4 m^3 , (m^3);
 G_p ——气井的累积产气量, 10^4 m^3 , (m^3);
 h ——气层有效厚度, m , (m);
 φ ——气层有效孔隙度, frac , (frac);
 R^2 ——线性回归的相关系数, frac , (frac);
 \ln ——以 e 为底的自然对数符号;
 \log ——以 10 为底的自然对数符号;
 α_p, β_p ——拟压力弹性二相法直线的截距和斜率;
 α_1, β_1 ——压力一次方弹性二相法直线的截距和
斜率;
 α_2, β_2 ——压力平方弹性二相法直线的截距和斜率。

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。
- [2] 国家石油与化学工业局发布: 中华人民共和国石油与天然气行业标准, SY/T 6098-1994。
- [3] 国家石油与化学工业局发布: 中华人民共和国石油与天然气行业标准, SY/T 6098-2000。
- [4] 国家石油与化学工业局发布: 中华人民共和国石油与天然气行业标准, SY/T 6098-2010。
- [5] 国家石油与化学工业局发布: 中华人民共和国石油与天然气行业标准, SY/T 6098-2022。
- [6] Canada Energy Resources Conservation Board: Theory and Practice of the Testing of Gas Wells, Third Edition, 1975, 4-34-4-36.
- [7] Chaudhry, A.U.: Gas Well Testing Handbook, Gulf Professional Publishing is Imprint Elsevier, 2003, 255-256, 309-314.
- [8] Earlougher, R. C.: Advances in well test analysis, Society of Petroleum Engineers of AIME, New York, 1997, 29-30.
- [9] John Lee. and Wattenbarger, R. A.: Gas reservoir engineering, First Printing, Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, Richardson, 1996, 94-95.
- [10] Al-Hussainy, R., Ramey, H.J. and Crawford, P.B.: The Flow of Real Gases Through Porous Media, JPT(May, 1966)624-636.
- [11] Wattenbarger, R. A., Ramey, H. J. Jr: Gas Well Testing with Turbulence Damage and Wellbore Storage, JPT (Aug, 1968) 877-887.
- [12] 陈元千: 油气藏工程实用方法, 石油工业出版社, 北京, 1999, 263-277。
- [13] 陈元千: 现代油藏工程(第2版), 石油工业出版社, 北京, 2020, 254-259。

(编辑 顾丽媛)