

引用格式:陈元千,刘洋,王鑫.气井定产量和变产量弹性二相法的通式及应用[J].油气地质与采收率,2024,31(1):72-77.  
CHEN Yuanqian, LIU Yang, WANG Xin. The general formula and application for the elastic two-phase method with stable and variable rate of gas wells[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1): 72-77.

## 气井定产量和变产量弹性二相法的通式及应用

陈元千,刘洋,王鑫

(中国石油勘探开发研究院,北京100083)

**摘要:**对于受封闭边界控制的气体流动,当气井完成试气和关井取得原始地层压力之后,若以某稳定产量开井生产,测试的井底流压的压降曲线,根据压力动态的变化特征,可划分为非稳态阶段、过渡阶段和拟稳态阶段。其中的拟稳态阶段,称为弹性二相法阶段。在弹性二相法阶段的井控范围内,井底流压呈等速下降。本文基于陈元千提出的压力一次方、压力平方和拟压力表示的定产量弹性二相法,以及基于Blasingame提出的压力一次方表示的变产量弹性二相法,分别建立了气井定产量和变产量弹性二相法的通式。通过实例的应用表明,两个通式是实用有效的。

**关键词:**气井;定产量;变产量;拟压力;压力一次方;压力平方;弹性二相法

文章编号:1009-9603(2024)01-0072-06

DOI:10.13673/j.pgre.202307027

中图分类号:TE32\*8

文献标识码:A

## The general formula and application for the elastic two-phase method with stable and variable rate of gas wells

CHEN Yuanqian, LIU Yang, WANG Xin

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

**Abstract:** For the gas flow controlled by the closed boundary, after the completion of gas testing and shut-in to obtain the original formation pressure, the pressure draw down curves can be divided into three stages: unsteady state, transit state and pseudo-steady state. The pseudo-steady state is called elastic two-phase state, and the pressure within the well control range of the elastic two-phase state decreases at a constant velocity. This article established the general formulas for the stable rate and variable rate elastic two-phase method of gas wells, based on the stable rate elastic two-phase method represented by pressure first power, pressure square and pseudo pressure proposed by Chen Yuanqian, and the variable rate elastic two-phase method represented by pressure first power proposed by Blasingame. The practical application shows that the general formula provided in this paper are practical and effective.

**Key words:** gas well; stable rate; variable rate; pseudo-pressure; pressure one power; pressure squared; elastic two-phase method

弹性二相法又称为拟稳态法(Pseudo-Steady-State Method)或气藏探边测试法(Reservoir Limit Testing Method)。该方法主要用于评价岩性、断块和裂缝系统井控的原始地质储量,因此,受到人们的普遍关注。陈元千<sup>[1]</sup>提出的定产量压力平方表示的弹性二相法,在国内得到了重视和应用,连续四

次被列入国家油气行业标准<sup>[2-5]</sup>。Blasingame<sup>[6,7]</sup>提出的变产量压力一次方弹性二相法,受到了IHS Markit和孙贺东等的重视和引用<sup>[8,9]</sup>,并在文献<sup>[10]</sup>中得到了有效应用。本文基于文献<sup>[11,12]</sup>提出的拟压力表达式和简化式,提出了拟压力、压力一次方和压力平方表示的弹性二相法关系式。

收稿日期:2023-07-27。

作者简介:陈元千(1933—),男,河南兰考人,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。E-mail:1470706289@qq.com。

## 1 气井定产量弹性二相法的通式

对于一口新井,在完成试气并取得关闭的原始地层压力后,以某稳定产量开井生产进行压降曲线测试时,当井底流压达到拟稳态后,利用拟压力、压力一次方和压力平方表示的弹性二相法通式为<sup>[10]</sup>:

$$J_s(t) = \alpha_s + \beta_s t \quad (1)$$

在(1)式中的 $J_s(t)$ ,称为定产量弹性二相法的压力函数,不同压力方式的 $J_s(t)$ 表示为:

$$J_s(t) = \frac{\psi(P_i) - \psi(P_{wf})}{q_g} = \frac{\Delta\psi(P)}{q_g} \quad (\text{拟压力}) \quad (2)$$

$$J_s(t) = \frac{P_i - P_{wf}}{q_g} = \frac{\Delta P}{q_g} \quad (\text{压力一次方}) \quad (3)$$

$$J_s(t) = \frac{P_i^2 - P_{wf}^2}{q_g} = \frac{\Delta P^2}{q_g} \quad (\text{压力平方}) \quad (4)$$

在(1)式中的 $\alpha_s$ 为直线的截距,不同压力方式的 $\alpha_s$ 表示为:

$$\alpha_{sp} = \frac{4.24 \times 10^4 P_{sc} T}{KhT_{sc}} \left( \log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (\text{拟压力}) \quad (5)$$

$$\alpha_{s1} = \frac{2.12 \times 10^4 B_{gi} \mu_{gi}}{Kh} \left( \log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (\text{压力一次方}) \quad (6)$$

$$\alpha_{s2} = \frac{4.24 \times 10^4 \mu_{gi} Z_i P_{sc} T}{KhT_{sc}} \left( \log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (\text{压力平方}) \quad (7)$$

式中:

$$r_{we}^2 = r_w^2 e^{-2S} \quad (8)$$

在(1)式中的 $\beta_s$ 为直线的斜率,不同压力方式的 $\beta_s$ 表示为:

$$\beta_{sp} = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_{sc} T}{GC_{ii}^* B_{gi} \mu_{gi} T_{sc}} \quad (\text{拟压力}) \quad (9)$$

$$\beta_{s1} = \frac{4.167 \times 10^{-2}}{GC_{ii}^*} \quad (\text{压力一次方}) \quad (10)$$

$$\beta_{s2} = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_i}{GC_{ii}^*} \quad (\text{压力平方}) \quad (11)$$

式中:

$$C_{ii}^* = C_{gi} + \frac{C_{wi} S_{wi} + C_f}{S_{gi}} \quad (12)$$

当由(1)式的线性回归求得直线 $\alpha_s$ 和 $\beta_s$ 的数值后,再由(9)式至(11)式改写的下式,确定不同压力方式的井控原始地质储量的关系式为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_{sc} T}{\beta_{sp} C_{ii}^* B_{gi} \mu_{gi} T_{sc}} \quad (\text{拟压力}) \quad (13)$$

$$G = \frac{4.167 \times 10^{-2}}{\beta_{s1} C_{ii}^*} \quad (\text{压力一次方}) \quad (14)$$

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_i}{\beta_{s2} C_{ii}^*} \quad (\text{压力平方}) \quad (15)$$

## 2 气井变产量弹性二相法的通式

在测试气井井底压降曲线时,如果气井的产量不能保持稳定,而随时间发生递减时,则利用Blasingame的物质平衡时间<sup>[6,7]</sup>,可以写出拟压力、压力一次方和压力平方表示的弹性二相法通式为<sup>[10]</sup>:

$$J_R(t) = \alpha_R + \beta_R t_m \quad (16)$$

在(16)式中的 $J_R(t)$ ,称为变产量弹性二相法的压力函数,不同压力方式的 $J_R(t)$ 表示为:

$$J_R(t) = \frac{\psi(P_i) - \psi(P_{wf})}{q_g(t)} = \frac{\Delta\psi(P)}{q_g(t)} \quad (\text{拟压力}) \quad (17)$$

$$J_R(t) = \frac{P_i - P_{wf}}{q_g(t)} = \frac{\Delta P}{q_g(t)} \quad (\text{压力一次方}) \quad (18)$$

$$J_R(t) = \frac{P_i^2 - P_{wf}^2}{q_g(t)} = \frac{\Delta P^2}{q_g(t)} \quad (\text{压力平方}) \quad (19)$$

在(16)式中的 $\alpha_R$ 为直线的截距,不同压力方式的 $\alpha_R$ 表示为:

$$\alpha_{Rp} = \frac{4.24 \times 10^4 P_{sc} T}{KhT_{sc}} \left( \log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (\text{拟压力}) \quad (20)$$

$$\alpha_{R1} = \frac{2.12 \times 10^4 B_{gi} \mu_{gi}}{Kh} \left( \log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (\text{压力一次方}) \quad (21)$$

$$\alpha_{R2} = \frac{4.24 \times 10^4 \mu_{gi} Z_i P_{sc} T}{KhT_{sc}} \left( \log \frac{2.246A}{C_A r_{we}^2} \right) \quad (\text{压力平方}) \quad (22)$$

在(16)式中的 $\beta_R$ 为直线的斜率,不同压力方式的 $\beta_R$ 表示为:

$$\beta_{Rp} = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_{sc} T}{GC_{ii}^* B_{gi} \mu_{gi} T_{sc}} \quad (\text{拟压力}) \quad (23)$$

$$\beta_{R1} = \frac{4.167 \times 10^{-2}}{GC_{ii}^*} \quad (\text{压力一次方}) \quad (24)$$

$$\beta_{R2} = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_i}{GC_{ii}^*} \quad (\text{压力平方}) \quad (25)$$

在(16)式中的 $t_m$ 为Blasingame变产量的物质平衡时间<sup>[6,7]</sup>,表示为:

$$t_m = \frac{24G_p(t)}{q_g(t)} \quad (26)$$

当由(16)式的线性回归求得直线 $\alpha_R$ 和 $\beta_R$ 的数值后,再由(23)式至(25)式改写的下式,确定不同

压力方式井控原始地质储量的关系式为：

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_{sc} T}{\beta_{Rp} C_{ii}^* B_{gi} \mu_{gi} T_{sc}} \quad (\text{拟压力}) \quad (27)$$

$$G = \frac{4.167 \times 10^{-2}}{\beta_{R1} C_{ii}^*} \quad (\text{压力一次方}) \quad (28)$$

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_i}{\beta_{R2} C_{ii}^*} \quad (\text{压力平方}) \quad (29)$$

### 3 应用实例

#### 3.1 苏5井(定产量)

中国苏里格气田的苏5井,钻遇的是二叠系低渗透致密砂岩气藏。在射孔完井后经人工水压力

裂投产,此后关井测试的原始地层压力  $P_i=29.06$  MPa。储层和流体物性参数为: $\phi=0.097$  frac,  $S_{gi}=0.654$  frac,  $h=16.8$  m,  $r_w=0.1$  m,  $C_{ii}^*=0.0344$  MPa<sup>-1</sup>,  $C_{ii}=0.0225$  MPa<sup>-1</sup>,  $\gamma_g=0.66$  dim,  $\mu_{gi}=0.0224$  mPa·s,  $B_{gi}=0.0043$  dim,  $Z_i=0.962$ ,  $T=378$  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  $q_g=10 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d连续进行了30 d的压降曲线测试。测试的数据和有关的计算数据列于表1。

根据(2)式、(3)式和(4)式,分别与(1)式的关系,利用表1的数据绘成的定产量拟压力、压力一次方和压力平方弹性二相法关系图(见图1至图3)。由图1至图3直线段数据的线性回归,求得三种压

表1 苏5井测试和计算数据  
Table1 Testing and calculating data of Su 5 well

$t$ (h)	$q_g$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d)	$P_{wf}$ (MPa)	$\Delta P/q_g$ (MPa/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d))	$P_{wf}^2$ (MPa <sup>2</sup> )	$\Delta P^2/q_g$ (MPa <sup>2</sup> /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d))	$\psi(P_{wf})$ (MPa <sup>2</sup> /(mPa·s))	$\Delta\psi(P)/q_g$ (MPa <sup>2</sup> /(mPa·s)/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d))
1.08	10	26.722	0.2338	714.0653	13.0418	42975	591.8647
2.664	10	26.007	0.3053	676.3640	16.8120	41165	772.8670
3.336	10	25.913	0.3147	671.4836	17.3000	40927	796.6631
4.392	10	25.819	0.3241	666.6208	17.7863	40689	820.4592
5.472	10	25.703	0.3357	660.6442	18.3839	40395	849.8246
6.792	10	25.602	0.3458	655.4624	18.9021	40139	875.3927
8.280	10	25.561	0.3499	653.3647	19.1119	40036	885.7719
9.480	10	25.495	0.3565	649.9950	19.4489	39869	902.4798
12.120	10	25.373	0.3687	643.7891	20.0694	39560	933.3641
15.336	10	25.335	0.3725	641.8622	20.2621	39464	942.9838
19.992	10	25.233	0.3827	636.7043	20.7779	39205	968.8051
26.400	10	25.148	0.3912	632.4219	21.2062	38990	990.3228
36.528	10	24.977	0.4083	623.8505	22.0633	38557	1033.6115
43.200	10	24.913	0.4147	620.6576	22.3826	38395	1049.8131
54.672	10	24.705	0.4355	610.3370	23.4147	37869	1102.4683
69.336	10	24.511	0.4549	600.7891	24.3694	37378	1151.5794
93.984	10	24.187	0.4873	585.0110	25.9473	36557	1233.6000
125.496	10	23.816	0.5244	567.2019	27.7282	35618	1327.5186
162.960	10	23.452	0.5608	549.9963	29.4487	34697	1419.6652
200.280	10	23.166	0.5894	536.6636	30.7820	33973	1492.0661
260.952	10	22.538	0.6522	507.9614	33.6522	32383	1651.0443
335.952	10	21.921	0.7139	480.5302	36.3953	30821	1807.2379
398.952	10	21.481	0.7579	461.4334	38.3050	29707	1918.6239
463.296	10	21.013	0.8047	441.5462	40.2937	28522	2037.0981
531.960	10	20.528	0.8532	421.3988	42.3085	27295	2159.8758
589.632	10	20.093	0.8967	403.7286	44.0755	26193	2269.9961
676.944	10	19.504	0.9556	380.4060	46.4078	24702	2419.1014
720.888	10	19.212	0.9848	369.1009	47.5383	23963	2493.0212

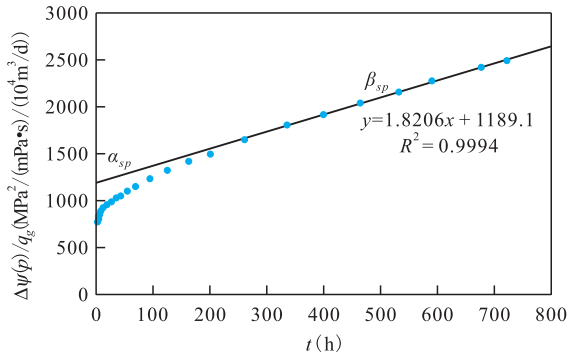


图1 苏5井定产量弹性二相法  $\Delta\psi(p)$  与  $t$  的关系图  
Fig.1 The plot of  $\Delta\psi(p)$  vs.  $t$  of constant rate elastic two-phase method of Su 5 well

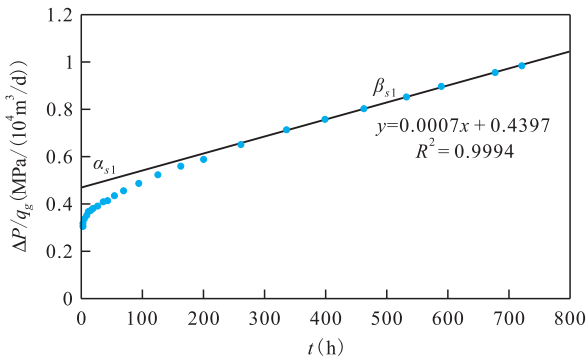


图2 苏5井定产量弹性二相法  $\Delta P$  与  $t$  的关系图  
Fig.2 The plot of  $\Delta P$  vs.  $t$  of constant rate elastic two-phase method of Su 5 well

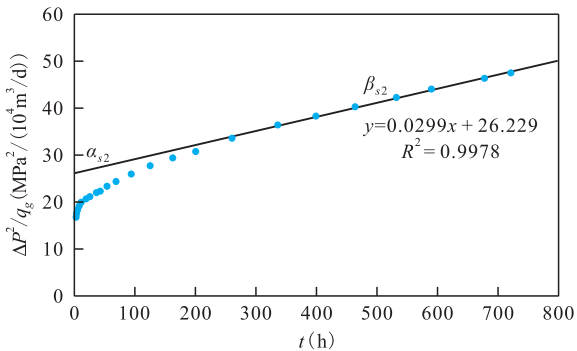


图3 苏5井定产量弹性二相法  $\Delta P^2$  与  $t$  的关系图  
Fig.3 The plot of  $\Delta P^2$  vs.  $t$  of constant rate elastic two-phase method of Su 5 well

力方式的直线截距、斜率和相关系数列入表2。

将已知各参数值代入(13)式得拟压力法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} \times 0.101 \times 378}{1.8206 \times 0.0344 \times 0.0043 \times 0.0224 \times 239} = 1800 \times 10^4 \text{m}^3$$

将已知各参数值代入(14)式得压力一次方法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{4.167 \times 10^{-2}}{0.0007 \times 0.0344} = 1730 \times 10^4 \text{m}^3$$

表2 苏5井定产量不同压力方式的  $\alpha_s, \beta_s$  和  $R^2$  的数值  
Table2 The values of  $\alpha_s, \beta_s$  and  $R^2$  for constant rate different pressure forms of Su 5 well

方法	截距, $\alpha_s$	斜率, $\beta_s$	相关系数, $R^2$
拟压力	1189.1	1.8206	0.9994
压力一次方	0.4697	0.0007	0.9994
压力平方	26.229	0.0299	0.9978

将已知各参数值代入(15)式得压力平方方法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} \times 29.06}{0.0299 \times 0.0344} = 2354 \times 10^4 \text{m}^3$$

由上述的评价结果可以看出,准确可靠的拟压力法评价的结果居中,压力一次方法偏低,压力平方方法偏高。

### 3.2 花2-3井(变产量)

中国海南岛花场气藏的花2-3井,储层和流体物性的参数如下:气层埋深为3057 m,  $\phi=0.15$  frac,  $S_{gi}=0.70$  frac,  $h=20.4$  m,  $r_w=0.1$  m,  $C_{ti}^*=0.0392$  MPa<sup>-1</sup>,  $\gamma_g=0.872$  dim,  $\mu_{gi}=0.0253$  mPa·s,  $Z_i=0.893$ ,  $B_{gi}=0.0049$  dim,  $T=406$  K,  $T_{sc}=293$  K,  $P_i=25.5$  MPa,  $P_{sc}=0.101$  MPa。气井测试的数据和有关的计算数据列于表3。

根据(17)式、(18)式和(19)式,分别与(16)式的关系,利用表3的有关数据绘成的变产量拟压力、压力一次方和压力平方弹性二相法的关系图(见图4至图6)。由图4至图6直线段数据的线性回归,求得三种压力方式的直线截距、斜率和相关系数列于表4。

将已知各参数值代入(13)式得拟压力法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} \times 0.101 \times 406}{0.1496 \times 0.0392 \times 0.0049 \times 0.0253 \times 293} = 16043 \times 10^4 \text{m}^3 = 1.60 \times 10^8 \text{m}^3$$

将已知各参数值代入(14)式得压力一次方法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{4.167 \times 10^{-2}}{0.0001 \times 0.0392} = 15180 \times 10^4 \text{m}^3 = 1.52 \times 10^8 \text{m}^3$$

将已知各参数值代入(15)式得压力平方方法评价的井控原始地质储量为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} \times 25.5}{0.0029 \times 0.0392} = 18687 \times 10^4 \text{m}^3 = 1.87 \times 10^8 \text{m}^3$$

由变产量弹性二相法评价的结果看出,同定产量弹性二相法一样:拟压力法居中,压力一次方法偏低,压力平方方法偏高。

表3 花2-3井测试和计算的数据  
Table3 Testing and calculating data of Hua 2-3 well

$t$ (h)	$q_g(t)$ ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	$P_{wf}$ (MPa)	$\Delta P/q_g$ (MPa/ ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ))	$P_{wf}^2$ ( $\text{MPa}^2$ )	$\Delta P^2/q_g$ ( $\text{MPa}^2/$ ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ))	$\psi(P_{wf})$ ( $\text{MPa}^2/$ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ))	$\Delta\psi(P)/q_g$ ( $\text{MPa}^2/$ ( $\text{mPa}\cdot\text{s})/(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$ )	$G_p(t)$ ( $10^4 \text{ m}^3$ )	$t_m$ (h)
602	6.5936	22.77	0.414	518.47	19.986	32009	910.8833	165.5	602
2016	7.3063	22.00	0.479	484.00	22.754	30315	1053.8850	596.1	1958
5530	7.8205	20.00	0.703	400.00	31.999	25915	1547.2157	1777.0	5453
6962	6.1808	20.00	0.890	400.00	40.488	25915	1957.6754	2204.5	8560
11354	3.8626	19.00	1.683	361.00	74.885	23715	3702.1695	3272.5	20333
13562	4.3998	18.00	1.705	324.00	74.151	21515	3750.1705	3666.0	19997
14306	4.1137	17.68	1.900	312.72	82.050	20811	4182.1231	3793.6	22132

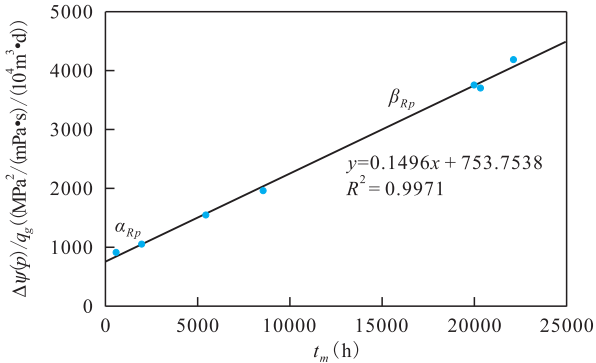


图4 花2-3井变产量弹性二相法  $\Delta\psi(p)$  与  $t$  的关系图  
Fig.4 The plot of  $\Delta\psi(p)$  vs.  $t$  of variable rate elastic two-phase method of Hua 2-3 well

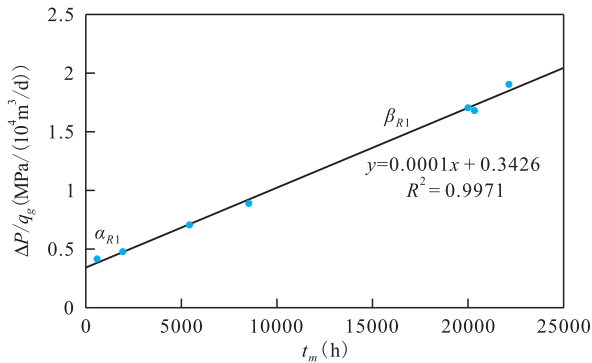


图5 花2-3井变产量弹性二相法  $\Delta P$  与  $t$  的关系图  
Fig.5 The plot of  $\Delta P$  vs.  $t$  of variable rate elastic two-phase method of Hua 2-3 well

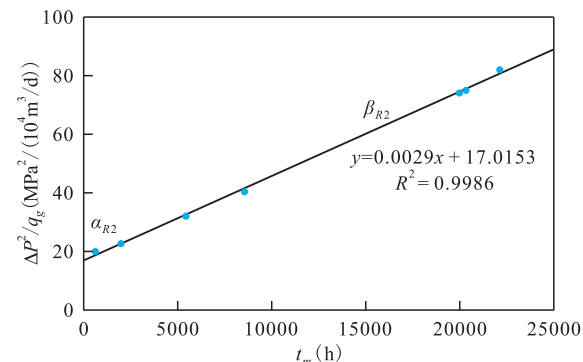


图6 花2-3井变产量弹性二相法  $\Delta P^2$  与  $t$  的关系图  
Fig.6 The plot of  $\Delta P^2$  vs.  $t$  of variable rate elastic two-phase method of Hua 2-3 well

表4 花2-3井变产量不同压力方式的  $\alpha_s, \beta_s$  和  $R^2$  的数值  
Table2 The values of  $\alpha_s, \beta_s$  and  $R^2$  for variable rate different pressure forms of Hua 2-3 well

方法	截距, $\alpha_R$	斜率, $\beta_R$	相关系数, $R^2$
拟压力	753.7538	0.1496	0.9971
压力一次方	0.3426	0.0001	0.9971
压力平方	17.0153	0.0029	0.9986

## 4 结论

弹性二相法是利用早期探井、评价井或开发井,利用完井后测试的压降曲线资料,评价定容封闭岩性、断块和裂缝系统气藏,井控原始地质储量的重要动态法。气井的弹性二相法可分别由拟压力、压力一次方和压力平方表示,也可分别由定产量和变产量表示。基于陈元千等提出的定产量拟压力、压力一次方和压力平方的弹性二相法,以及基于Blasingame提出的变产量压力一次方的弹性二相法,经归纳建立了定产量和变产量的拟压力、压力一次方和压力平方弹性二相法的通式。通过实例应用表明,两个通式是实用有效的。评价的井控原始地质储量,拟压力法居中,压力一次方法略低,压力平方方法略高。国内的实际应用表明,压力平方方法与定容气藏的压降法,评价的结果基本一致。

### 符号解释

$\phi(P)$  ——  $P$  压力下拟压力,  $\phi(P) = 2 \int_{P_i, \mu Z}^P \frac{P}{P_i, \mu Z} dP$ ,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;

$\phi(P_i)$  ——  $P_i$  压力下拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;

$\phi(P_{wf})$  ——  $P_{wf}$  压力下拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;

$\Delta\phi(P)$  —— 拟压力差,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ ;

$J_s(t)$  —— 定产量的J函数,  $\text{MPa}^2/(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$ ;

$J_R(t)$  —— 变产量的J函数,  $\text{MPa}^2/(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$ ;

$P$  —— 压力一次方, MPa;  
 $P^2$  —— 压力平方, MPa<sup>2</sup>;  
 $P_i$  —— 原始地层压力, MPa;  
 $P_o$  —— 拟压力数值积分的基准压力(可取为0), MPa;  
 $P_{sc}$  —— 地面标准压力, 取值为0.101, MPa;  
 $P_{wf}$  —— 井底流压, MPa;  
 $\Delta P$  —— 一次方的压力差, MPa;  
 $\Delta P^2$  —— 平方的压力差, MPa<sup>2</sup>;  
 $A$  —— 气井控制的含气面积, m<sup>2</sup>;  
 $B_g$  ——  $P$ 压力下的气体体积系数, dim;  
 $B_{gi}$  ——  $P_i$ 压力下的气体原始体积系数, dim;  
 $C_A$  —— Dietz形状因子, dim;  
 $C_f$  —— 地层岩石有效压缩系数, MPa<sup>-1</sup>;  
 $C_{gi}$  —— 气体原始压缩系数, MPa<sup>-1</sup>;  
 $C_{ti}^*$  —— 气藏总压缩系数, MPa<sup>-1</sup>;  
 $C_{wi}$  —— 地层束缚水压缩系数, MPa<sup>-1</sup>;  
 $G$  —— 气井控制的原始地质储量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;  
 $G_p(t)$  —— 变产量气井累积产气量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>;  
 $h$  —— 有效厚度, m;  
 $\phi$  —— 有效孔隙度, frac;  
 $K$  —— 有效渗透率, mD;  
 $q_g$  —— 气井的产量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;  
 $q_g(t)$  ——  $t$ 时间气井的产量, 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;  
 $r_e$  —— 驱动半径, m;  
 $r_w$  —— 井底半径, m;  
 $r_{we}$  —— 有效井底半径, 见(8)式, m;  
 $R^2$  —— 相关系数, frac;  
 $S$  —— 表皮系数, dim;  
 $S_{gi}$  —— 原始含气饱和度, frac;  
 $S_{wi}$  —— 原始含水饱和度, frac;  
 $t$  —— 生产时间, h;  
 $t_m$  —— Blasingame的物质平衡时间, h;  
 $T$  —— 地层温度, K;  
 $T_{sc}$  —— 地面标准温度(293), K;  
 $\gamma_g$  —— 气体相对密度, dim;  
 $\mu_g$  ——  $P$ 压力下气体黏度, mPa·s;  
 $\mu_{gi}$  ——  $P_i$ 压力下气体黏度, mPa·s;  
 $Z$  ——  $P$ 压力下的气体偏差系数, dim;  
 $Z_i$  ——  $P_i$ 压力下的气体偏差系数, dim;  
 $\alpha_s, \beta_s$  —— 定产量弹性二相法直线的截距和斜率;  
 $\alpha_R, \beta_R$  —— 变产量弹性二相法直线的截距和斜率;  
 $\alpha_{sp}, \beta_{sp}$  —— 定产量拟压力弹性二相法直线的截距和斜率;  
 $\alpha_{s1}, \beta_{s1}$  —— 定产量压力一次方弹性二相法直线的截距和斜率;  
 $\alpha_{s2}, \beta_{s2}$  —— 定产量压力平方弹性二相法直线的截距和斜率;  
 $\alpha_{Rp}, \beta_{Rp}$  —— 变产量拟压力弹性二相法直线的截距和

斜率;  
 $\alpha_{R1}, \beta_{R1}$  —— 变产量压力一次方弹性二相法直线的截距和斜率;  
 $\alpha_{R2}, \beta_{R2}$  —— 变产量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。  
Chen Yuanqian: Petroleum reservoir engineering calculation methods (continuation), Petroleum Industry Press, Beijing, 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。  
Published by State Bureau of Petroleum and Chemical Industries: PRC Oil and Gas Industry Standard, 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。  
Published by State Bureau of Petroleum and Chemical Industries: PRC Oil and Gas Industry Standard, 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。  
Published by State Bureau of Petroleum and Chemical Industries: PRC Oil and Gas Industry Standard, 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。  
Published by State Bureau of Petroleum and Chemical Industries: PRC Oil and Gas Industry Standard, SY/T 6098-2022.
- [6] Blasingame, T. and Lee, W.J.: The variable-rate reservoir limits testing of gas wells. SPE 17708-MS, 1988.
- [7] Blasingame, T. and Lee, W.J.: Variable-rate reservoir limits testing. SPE 15028-MS, 1986.
- [8] IHS Harmony™ 2016V3 Single-user Help-PDF, Last revised: February 24, 2020, IHS Markit Ltd, 2020, 64-104.
- [9] 孙贺东: 气井现代产量递减分析方法及应用, 石油工业出版社, 北京, 2013, 64-194。  
Sun Hedong: Advanced production decline analysis and application, Petroleum Industry Press, Beijing, 2013: 64-194.
- [10] 陈元千, 王鑫: 气井变产量弹性二相法的应用, 油气地质与采收率, 2023, 30(5)63-66。  
Chen Yuanqian, Wang Xin: Application of elastic two phase method with variable production in gas wells, Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(5)63-66.
- [11] Al-Hussainy, R., Ramey, H. J. Jr and Crawford, P. B.: The Flow of Real Gases Through Porous Media, JPT (May, 1966) 624-636.
- [12] Wattenbarger, R. A. and Ramey, H. J. Jr: Gas Well Testing with Turbulence Damage and Wellbore Storage, JPT (Aug, 1968)877-887.