

引用格式:陈元千,王鑫.气井变产量弹性二相法的应用[J].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[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(5): 63-66.

气井变产量弹性二相法的应用

陈元千,王 鑫

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:对于一口新气井,在气井产量保持稳定的条件下进行井底流压的压降曲线测试是一项重要的工作。气井的压降曲线分为非稳定阶段、过渡阶段和拟稳定阶段。其中非稳定阶段又称为弹性一相,拟稳定阶段称为弹性二相。前者的测试资料可用于确定气层的有效渗透率和气井的表皮系数,后者的测试资料主要用于评估气井控制的原始地质储量。然而,对于致密低渗透气层,气井压裂后的产量不能保持稳定,而是处于递减状态。本文提出了由压力一次方和压力二次方分别表示的变产量压降曲线拟稳定阶段的弹性二相法关系式,可用于评估定容气藏的原始地质储量。实例应用表明2种方法实用有效且评估结果基本相同。

关键词:气井;变产量;拟稳定阶段;弹性二相法;应用;评估

文章编号:1009-9603(2023)05-0063-04

DOI:10.13673/j.pgre.202209004

中图分类号:TE32²8

文献标识码:A

Application of elastic two phase method with variable production in gas wells

CHEN Yuanqian, WANG Xin

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

Abstract: For a new gas well, it is an important work to test the pressure drawdown curve of the bottom-hole flowing pressure under the condition of stable gas well production. The pressure drawdown curves of gas wells can be divided into the unsteady state stage, transition stage, and pseudosteady state stage. The unsteady state stage is also called the elastic one phase, and the pseudosteady state stage is called the elastic two phase. The former test data can be used to determine the effective permeability of gas reservoirs and the skin coefficient of gas wells; the latter test data are mainly used to evaluate the original gas in place controlled by a gas well. However, for tight and low permeability gas reservoirs, the production of a gas well after fracturing cannot remain stable and is decreasing. The elastic two phase method relationships of the pseudosteady stage of the pressure drawdown curves with a variable production which are expressed by pressure and pressure-squared respectively are proposed in this paper, and they can be used to evaluate the original gas in place of the volumetric gas reservoir. The practical application shows that these two methods are practical and effective, and the evaluation results are basically the same.

Key words: gas well; variable production; pseudosteady stage; elastic two phase method; application; evaluation

陈元千提出了在气井稳定产量的生产条件下,由压力二次方和拟压力表示的拟稳定阶段的压降方程,中国称为弹性二相法,其可以有效地评估井控定容气藏的原始地质储量^[1-5]。应当指出,对于致密低渗透和裂缝系统的定容气藏,在进行气井的压降曲线测试时,产量很难实现稳定,而是处于递减

状态。笔者基于文献[1]提出了由压力一次方和压力二次方分别表示的变产量压降曲线拟稳定阶段的弹性二相法关系式。BLASINGAME基于EARLOUGHER建立的定产量压降曲线拟稳定阶段方程^[6],提出了变产量压降曲线拟稳定阶段方程^[7-10],并经过推导研究表明变产量对压降曲线压力叠加

收稿日期:2022-09-10。

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:873976768@qq.com。

的影响较小,可以忽略不计^[7]。

1 压降曲线动态阶段的时间划分

对于一口关闭的新气井,当以某稳定产量开井生产时,井底流压下降的动态可划分为非稳定阶段、过渡阶段(又称为非稳定阶段后期)和拟稳定阶段。划分3个阶段的时间由下式确定^[11]:

$$t = \frac{277.8t_D\phi\mu_{gi}C_i r_e^2}{K} \quad (1)$$

其中:

$$C_i = C_{gi}S_{gi} + C_wS_{wi} + C_f \quad (2)$$

当无因次时间 $t_D=0.1$ 时,由(1)式得非稳定阶段结束的时间,其表达式为:

$$t_{end} = \frac{27.78\phi\mu_{gi}C_i r_e^2}{K} \quad (3)$$

当无因次时间 $t_D=0.3$ 时,由(1)式得拟稳定阶段开始的时间,其表达式为:

$$t_{pss} = \frac{83.34\phi\mu_{gi}C_i r_e^2}{K} \quad (4)$$

2 气井变产量弹性二相法的关系式

2.1 由压力一次方表示的关系式

对于一口新气井,当投产后的产量不能保持稳定而是发生递减时,由压力一次方表示的拟稳定阶段变产量压降方程的直线关系表示为^[1]:

$$\frac{P_i - P_{wf}}{q_g(t)} = \alpha_1 + \beta_1 t_c \quad (5)$$

其中:

$$t_c = \frac{24G_p(t)}{q_g(t)} \quad (6)$$

$$\alpha_1 = m_1 \left(\log \frac{A}{C_A r_w^2} + 0.351 + 0.87S \right) \quad (7)$$

$$\beta_1 = \frac{4.167 \times 10^{-2}}{GC_i^*} \quad (8)$$

$$m_1 = \frac{2.12 \times 10^4 B_{gi} \mu_{gi}}{Kh} \quad (9)$$

$$C_i^* = C_{gi} + \frac{C_w S_{wi} + C_f}{S_{gi}} \quad (10)$$

由于(10)式右侧第1项数值远大于第2项数值,因此可以简化为:

$$C_i^* = C_{gi} = \frac{1}{P_i} \quad (11)$$

将(11)式代入(8)式可得利用压力一次方表示的变产量弹性二相法(简称压力一次方法)评估气井控制的原始地质储量关系式为:

2.2 由压力二次方表示的关系式

同上所述,由压力二次方表示的拟稳定阶段变产量压降方程的直线关系表示为^[1]:

$$\frac{P_i^2 - P_{wf}^2}{q_g(t)} = \alpha_2 + \beta_2 t_c \quad (13)$$

其中:

$$\alpha_2 = m_2 \left(\log \frac{A}{C_A r_w^2} + 0.351 + 0.87S \right) \quad (14)$$

$$\beta_2 = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_i}{GC_i^*} \quad (15)$$

$$m_2 = \frac{4.24 \times 10^4 \mu_{gi} Z_i P_{sc} T}{Kh T_{sc}} \quad (16)$$

将(11)式代入(15)式可得利用压力二次方表示的变产量弹性二相法(简称压力二次方法)评估气井控制的原始地质储量关系式为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} P_i^2}{\beta_2} \quad (17)$$

3 实例应用

中国海南岛花场气藏花2-3井地层和流体性质参数如下:气层埋深为3057 m,驱动半径为150 m,有效厚度为20.4 m,有效孔隙度为0.15,有效渗透率为2.911 mD,原始含气饱和度为0.70,总压缩系数为0.039 2 MPa⁻¹,气层温度为406 K,压力系数为0.834 MPa/m,气藏原始地层压力为25.5 MPa,气体原始地层黏度为0.025 3 mPa·s,相对密度为0.872,原始偏差系数为0.893,原始体积系数为0.004 9,拟临界压力为4.545 MPa,拟临界温度为246.28 K。花2-3井测试数据见表1。

将表1数据分别按(5)和(13)式的关系绘制于图1上。从图1可以看出,由压力一次方法和压力二次方法绘成的变产量关系均为相关系数很高的直线,表明花2-3井的生产动态已处于拟稳定阶段。经线性回归求得压力一次方直线的截距 $\alpha_1=0.342 7$,斜率 $\beta_1=6.8 \times 10^{-5}$,相关系数 $R=0.998 6$;压力二次方直线的截距 $\alpha_2=17.018$,斜率 $\beta_2=0.002 9$,相关系数 $R=0.999 3$ 。

将 P_i 和 β_1 的数值代入(12)式可得利用压力一次方法评估气井控制的原始地质储量为:

$$G = \frac{4.167 \times 10^{-2} \times 25.5}{6.8 \times 10^{-5}} \approx \quad (18)$$

$$15\ 626 \times 10^4 \text{ m}^3 \approx 1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$$

再将 P_i 和 β_2 的数值代入(17)式可得利用压力

表1 花2-3井测试数据
Table1 Test data of Well Hua 2-3

t/h	$q_g(t)/$ ($10^4 m^3 \cdot d^{-1}$)	P_{wf}/MPa	$((P_i - P_{wf})/q_g(t))/$ ($MPa \cdot (10^4 m^3 \cdot d^{-1})^{-1}$)	P_{wf}^2/MPa^2	$((P_i^2 - P_{wf}^2)/q_g(t))/$ ($MPa^2 \cdot (10^4 m^3 \cdot d^{-1})^{-1}$)	$G_p(t)/$ ($10^4 m^3$)	t_c/h
602	6.593 6	22.77	0.414	518.47	19.986	165.5	602
2 016	7.306 3	22.00	0.479	484.00	22.754	596.1	1 958
5 530	7.820 5	20.00	0.703	400.00	31.999	1 777.0	5 453
6 962	6.180 8	20.00	0.890	400.00	40.488	2 204.5	8 560
11 354	3.862 6	19.00	1.683	361.00	74.885	3 272.5	20 333
13 562	4.399 8	18.00	1.705	324.00	74.151	3 666.0	19 997
14 306	4.113 7	17.68	1.900	312.72	82.050	3 793.6	22 132

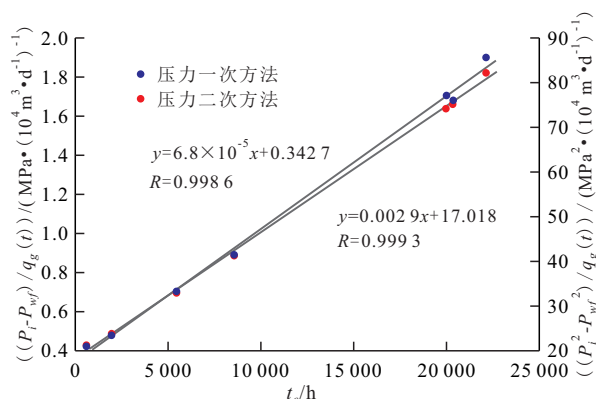


图1 花2-3井2种变产量弹性二相法的关系
Fig.1 Elastic two phase method with variable production of Well Hua 2-3

二次方法评估气井控制的原始地质储量为:

$$G = \frac{8.334 \times 10^{-2} \times 25.5^2}{0.0029} \approx 18\ 687 \times 10^4 m^3 \approx 1.87 \times 10^8 m^3 \quad (19)$$

由上述计算结果可以看出,变产量的压力一次方法和压力二次方法评估气井控制的原始地质储量比较接近。但从气体渗流理论和实例应用来说,压力二次方法要优于压力一次方法。

将已知参数代入(4)式,求得花2-3井进入拟稳定阶段的时间为:

$$t_{pss} = \frac{83.34 \times 0.15 \times 0.0253 \times 0.0392 \times 150^2}{2.911} \approx 95.8 h \quad (20)$$

由于花2-3井的 t_{pss} 约为95.8 h,因此该井在生产时间大于95.8 h之后,即进入了拟稳定阶段。由表1可以看出,花2-3井第1个测试点的时间为602 h,已是进入拟稳定阶段之后的时间。从图1可以看出,2种变产量弹性二相法的关系都是相关系数很高的直线。因此,利用变产量拟稳定阶段的弹性二相法评价的结果是可靠的。

4 结论

利用变产量拟稳定阶段的弹性二相法评估花

2-3井控制的原始地质储量,压力一次方法和压力二次方法分别为 1.52×10^8 和 $1.87 \times 10^8 m^3$,表明花2-3井控制的是一个低渗透小型凸镜状气藏。由于该井的压力系数为0.834 MPa/m,属于负异常气藏,因此花场气藏是由若干个互不连通的小型气藏组成。这一认识对于花场气藏的开发规划部署是有帮助的。

符号解释

- A ——气井控制的含气面积, m^2 ;
- B_{gi} —— P_i 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^{-1} ;
- C_{gi} ——气体的原始压缩系数, MPa^{-1} ;
- C_t ——气藏的总压缩系数, MPa^{-1} ;
- C_t^* ——气藏的总压缩系数($C_t^* = C_t/S_{gi}$), MPa^{-1} ;
- C_w ——地层束缚水的压缩系数, MPa^{-1} ;
- G ——气井控制的原始地质储量, $10^4 m^3$;
- $G_p(t)$ ——气井的累积产量, $10^4 m^3$;
- h ——气层有效厚度, m;
- K ——气层有效渗透率, mD;
- P_i ——原始地层压力, MPa;
- P_{sc} ——地面标准压力, MPa;
- P_{wf} ——井底流压, MPa;
- $q_g(t)$ ——气井的产量, $10^4 m^3/d$;
- r_e ——气井的驱动半径, m;
- r_w ——气井的井底半径, m;
- R ——相关系数;
- S ——气井的表皮系数, dim;
- S_{gi} ——地层原始含气饱和度, frac;
- S_{wi} ——地层束缚水饱和度, frac;
- t ——气井实际的生产时间, h;
- t_c ——气井生产的陈氏折算时间, h;
- t_D ——气井生产的无因次时间, dim;
- t_{end} ——非稳定阶段结束的时间, h;
- t_{pss} ——拟稳定阶段开始的时间, h;
- T ——气藏地层温度, K;

T_{sc} ——地面标准温度, K;
 Z_i —— P_i 下的气体偏差系数, dim;
 α_1, α_2 ——(5)和(13)式直线的截距;
 β_1, β_2 ——(5)和(13)式直线的斜率;
 μ_{gi} —— P_i 下的气体黏度, mPa·s;
 ϕ ——气层有效孔隙度, frac。

参考文献

- [1] 陈元千. 油气藏工程计算方法(续篇)[M]. 北京:石油工业出版社, 1991.
 CHEN Yuanqian. Petroleum reservoir engineering calculation methods (continuation) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [2] 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 东营:石油大学出版社, 1998.
 CHEN Yuanqian. Practical petroleum reservoir engineering methods [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1998.
- [3] 陈元千. 油气藏工程实践[M]. 北京:石油工业出版社, 2005.
 CHEN Yuanqian. The practice of petroleum engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [4] 陈元千. 油气藏工程实用方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
 CHEN Yuanqian. Practical methods of petroleum reservoir engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [5] 陈元千. 油气藏工程论文集(2013—2018)[M]. 北京:石油工业出版社, 2019.
 CHEN Yuanqian. Article collection of petroleum reservoir engineering (2013-2018) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [6] EARLOUGHER R C. Advances in well test analysis [M]. Richardson; SPE Monograph Series, 1977.
- [7] BLASINGAME T A, MCCRAY T L, LEE W J. Decline curve analysis for variable pressure drop and variable flowrate systems [C]. SPE 21513-MS, 1991.
- [8] BLASINGAME T, LEE W J. The variable-rate reservoir limits testing of gas wells [C]. SPE 17708-MS, 1988.
- [9] BLASINGAME T, LEE W J. Variable-rate reservoir limits testing [C]. SPE 15028-MS, 1986.
- [10] BLASINGAME T, LEE W J. Properties of homogeneous reservoirs, naturally fractured reservoirs, and hydraulically fractured reservoirs from decline curve analysis [C]. SPE 15018-MS, 1986.
- [11] 陈元千. 现代油藏工程[M]. 二版. 北京:石油工业出版社, 2020.
 CHEN Yuanqian. Modern petroleum reservoir engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.

编辑 何青芳

更正说明

本刊2023年第3期发表的《稠油高压火驱氧化特性实验研究》一文中,参考文献[33]有误,原文为:
 [33]袁成东,蒲万芬,郭征,等. 氧气还原空气驱的适用范围和含氧量极限[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 334-340.

YUAN Chengdong, PU Wanfen, GUO Zheng, et al. Applicable scope of oxygen-reduced air flooding and the limit of oxygen content [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 334-340.

现更正为:

[33]袁成东,蒲万芬,郭正,等. 轻质和重质原油氧化特性及其动力学[J]. 化学工程, 2014, 42(8): 56-59, 75.

YUAN Chengdong, PU Wanfen, GUO Zheng, et al. Oxidation behavior and kinetics of light oil and heavy oil [J]. Chemical Engineering, 2014, 42(8): 56-59, 75.