

一种试井模拟技术在南海高温高压气藏X1井 产能评价中的应用

雷霄,李树松,王雯娟,张风波,何志辉,马帅
(中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东 湛江 524057)

摘要:南海高温高压气井产能测试分析存在机械变表皮无法计算导致产能方程负异常的问题,导致无法有效评价高温高压气井无阻流量。提出以高温高压气井变表皮分析技术和试井模拟产能评价技术为主的高温高压气井试井模拟技术,计算储层真实污染情况,并根据试井模拟产能测试的流压、产量等进行无阻流量计算,消除了高温高压气井产能方程的负异常,进而确定高温高压气井的产能。高温高压气井试井模拟技术成功应用于南海高温高压气藏X1井,有效指导了气田配产。

关键词:高温高压;机械变表皮;无阻流量;试井模拟技术

中图分类号:TE373

文献标识码:A

Application of a well testing simulation technique in productivity evaluation of well-X1 in high temperature and high pressure reservoir

Lei Xiao, Li Shusong, Wang Wenjuan, Zhang Fengbo, He Zhihui and Ma Shuai

(Zhanjiang Branch of CNOOC(China) Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China)

Abstract: The following problems stood out in the deliverability tests and analysis of gas wells with high temperature and high pressure (HTHP) in South China Sea. Firstly, it was unable to accurately calculate the variable mechanical skin factors, resulting in the negative slope of deliverability equation, bringing about inaccurate calculation of the absolute open flow of HTHP gas wells. One new simulation technique, mainly consisting of variable skin analysis and productivity numerical simulation, for HTHP gas wells was proposed, and then the real damage could be evaluated accurately. In addition, the absolute open flow of HTHP gas wells was calculated based on flowing pressure and rates data in deliverability test simulation, eliminating the negative slope of deliverability equation. This simulation technique had been applied successfully well-X1 of HTHP gas reservoir in South China Sea, providing guidance for gas field production.

Key words: high temperature and high pressure, variable mechanical skin factor, absolute open flow, well testing simulation technique

高温高压气井具有地层压力高、产能高的特点,导致产能测试及评价存在以下两个方面的问题:1) 由于测试设备能力及气井工作制度调整能力有限(南海X气田测试最大产量不到无阻流量的20%),采用常规二项式分析时,微小的压力计测试或计量误差常常会导致二项式系数为负值,无法评价无阻流量;2) 由于高温高压气井地层压力高、产能高,导致代表储层污染的气井机械表皮在产能测试过程中变化较大,因此无法确定气井机械表皮和流量表皮,

进而无法评价井污染情况。

目前高温高压气井产能评价研究主要以合理测试压差设置^[1~8]、压力校正^[9~11]方面研究为主,但压力校正方法无实际依据,与此同时,对高温高压气井变表皮的研究主要集中在流量表皮^[12~15]的研究,缺乏机械变表皮的研究,进而导致计算的无阻流量可靠性差。针对目前高温高压气井产能评价存在的问题,提出以高温高压气井变表皮分析技术和试井模拟产能评价技术为主的高温高压气井试井模拟技术^[16],并

收稿日期:2017-09-23。

第一作者简介:雷霄(1972—),男,教授级高级工程师,硕士,油气藏工程和油气藏数值模拟。

应用于南海西部高温高压气田的生产实践。

1 高温高压气井试井模拟技术原理

首先通过高温高压气井变表皮技术确定测试层位真实污染情况,然后通过试井模拟产能技术重新模拟产能测试,并根据模拟产能测试的流压、产量等,采用压力平方法、拟压力法等进行无阻流量计算,进而准确计算高温高压气井的产能。

1.1 气井变表皮分析技术

1.1.1 气井变表皮原理

气井总表皮系数 S_t 是反映储层污染的机械表皮系数 S_r 和与流量相关的井筒附近储层气体高速非达西流动造成的表皮系数 S_q 的总和。

$$S_t = S_r + S_q \quad (1)$$

其中:

$$S_q = Dq \quad (2)$$

公式(2)中 D 为非达西流动系数。常规气井测试解释中 S_r 、 D 几乎不变,而 S_q 随着压力增加而增大,采用气井各个工作制度测试参数回归就可以求出代表储层污染的机械表皮系数 S_r 。而高温高压气井由于地层压力高、产能高,会导致气井机械表皮 S_r 随着测试出现逐渐变小的趋势,主要是由于随着近井地带的侵入,钻完井液随着测试被气体高速带出导致。经过不断回归计算得出 S_r 与测试产量存在负线性关系:

$$S_r = S_{r0} - Mqt \quad (3)$$

公式(3)中: S_{r0} 为初始的机械表皮系数; M 为机械表皮变化因子; q 为测试日产, 10^4m^3 ; t 为测试时间,d。

将公式(3)和公式(2)带入公式(1),得到气井总表皮系数公式:

$$S_t = S_{r0} - Mqt + Dq \quad (4)$$

1.1.2 气井变表皮计算

假设气井测试工作制度(气嘴)数量为 n ,带入公式(1),得到各个工作制度下总表皮系数:

$$S_{ti} = S_{r0} + S_{qi} \quad (5)$$

公式(5)中 i 为 $1 \sim n$ 。将公式(2)和公式(3)带入公式(5):

$$S_{ti} = S_{r0} - Mqt_i + Dq_i \quad (6)$$

其中: $S_{r0} = S_{r0} - Mqt_i$; $S_{qi} = Dq_i$

首先通过时间变表皮拟合得出各个工作制度下的气井总表皮系数 S_{ti} (图1),然后通过方程组求解及回归拟合,求出初始机械表皮系数 S_{r0} 。 M 为机械表皮变化因子; D 为非达西流动系数; S_{r0} 为最终机械表皮系数。

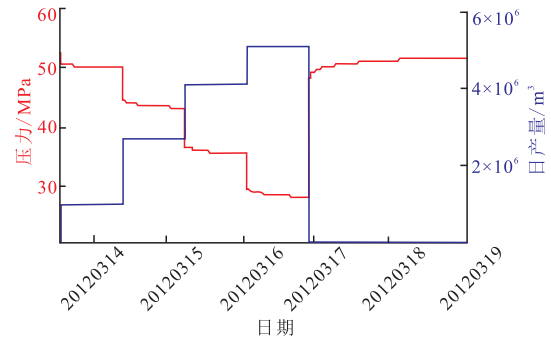


图1 气井压力历史拟合曲线
Fig. 1 Gas well pressure history fitting curve

1.2 试井模拟产能评价技术

首先,基于高温高压气井变表皮分析结果,并结合储层物性解释结果。采用运用试井模拟技术重新模拟产能测试,模拟设计的设计工作制度范围大约达到无阻流量的10%~60%(图2),使测试压差增大,消除了压力计测试或计量误差引起的产能方程的负异常现象。

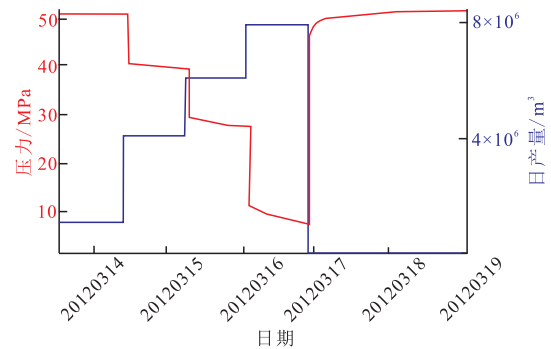


图2 试井模拟测试曲线
Fig. 2 Well test simulation test curve

根据试井模拟的流压、产量等,采用压力平方法、拟压力法等进行无阻流量回归计算,进而确定高温高压气井的产能。

2 高温高压气井试井模拟技术应用

南海西部X气田是一个高温高压气田,地层压

力 52.3 ~ 52.7 MPa, 地层温度 141 ~ 143 °C。X1 井是一口探井, 产能测试时, 采用四个气嘴工作制度, 但由于测试设备受到温压限制, 最大测试产量仅为 $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$, 远小于气井无阻流量, 导致 X1 井二项式产能曲线呈现负异常(图 3), 无法准确计算无阻流量。因此采用试井模拟技术来准确计算无阻流量。

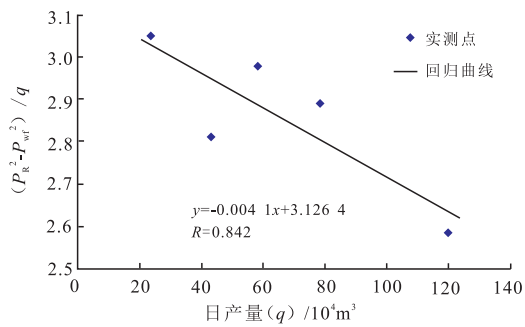


图3 X1井二项式产能曲线(原始测试数据)
Fig. 3 Binomial productivity curve of well-X1 (Original well testing data)

首先通过时间变表皮拟合就可以得出 X1 井四个工作制度下的气井总表皮系数 S_a (表 1)。通过方程组求解及回归拟合, 确定 X1 井变表皮和机械表皮与测试产量曲线关系(图 4), 并求出初始机械表皮系数 S_{ic} ,

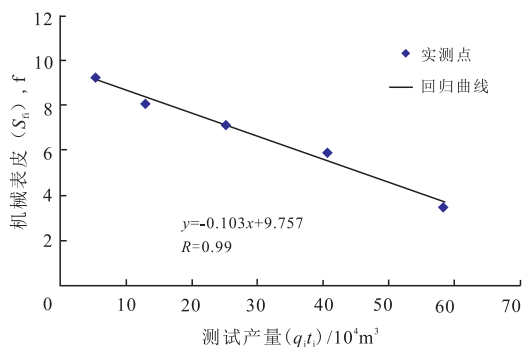


图4 X1井机械表皮与测试产量曲线关系
Fig. 4 Relation between mechanical skin and test yield curve of well-X1

M 为机械表皮变化因子, D 为非达西流动系数(表 1)。

$$S_a = 9.757 - 0.103q_{t,i} + 0.05q_i \quad (7)$$

然后, 基于 X1 井变表皮分析及储层物性解释结果, 运用试井模拟技术重新模拟 X1 井产能测试, 模拟设计的 X1 井测试工作制度合理(图 5), 共设计七个工作制度, 覆盖无阻流量的 70%, 消除了压力计测试或计量误差引起的产能方程的负异常现象。

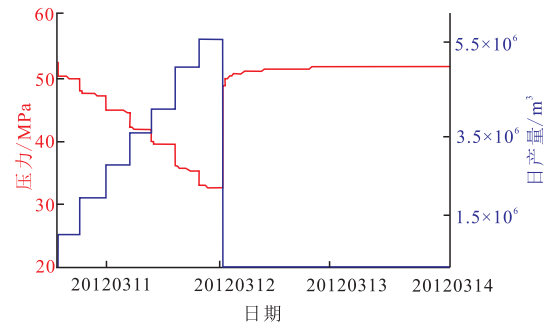


图5 X1井试井模拟测试曲线
Fig. 5 Curves of well testing simulation of well-X1

再根据 X1 井试井模拟得到的流压、产量等, 采用压力平方法、拟压力法等进行无阻流量回归计算(图 6), 进而准确确定 X1 井的无阻流量为 $7.29 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

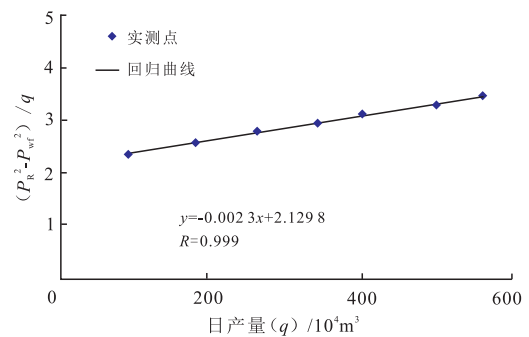


图6 X1井二项式产能曲线(试井模拟测试)
Fig. 6 Binomial productivity curve of well-X1 (Well testing simulation test)

表 1 X1 井变表皮分析结果

Table 1 Results of epidermal transformation analysis of well-X1

工作制度	序号	油嘴/mm	测试时间/h	产量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	流压/ MPa	地层压力/MPa	总表皮系数 (S_a), f	机械表皮 ($S_{e,i}$), f	流量表皮 ($S_{e,f}$), f	非达西流动系数(D)/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) ⁻¹	机械表皮变化因子 (M)/(m^3) ⁻¹	初始机械表皮 (S_{ic}), f
二开	1	6.35	5.5	23.6	51.83	52.69	10.5	9.3	1.2	0.05	0.103	9.76
	2	8.73	4.3	43.1	51.32	52.69	10.2	8.0	2.2			
	3	11.11	5.0	58.2	50.83	52.69	10.1	7.2	2.9			
	4	13.49	4.8	78.4	50.33	52.69	9.9	6.0	3.9			
三开	5	19.05	3.5	120.0	49.47	52.69	9.5	3.5	6.0			

3 结论

1) 创新提出高温高压气井机械变表皮分析技术,计算气井的机械表皮,确定储层真实污染情况。

2) 高温高压气井试井模拟产能技术基于变表皮分析结果,重新模拟产能测试,根据模拟产能测试的流压、产量等,采用压力平方法、拟压力法等进行无阻流量计算,消除了压力计测试或计量误差引起的产能方程的负异常现象,进而计算得到高温高压气井的产能。

3) 以高温高压气井变表皮分析技术和试井模拟产能技术为主的高温高压气井试井模拟技术应用于南海西部X气田X1井,计算得到X1井无阻流量,有效指导了后续气田开发的配产。

参考文献

- [1] 李治平,赵必荣,张敏渝,等.应用气井压力恢复曲线确定气井产能[J].天然气工业,1998,18(6):63-65.
- [2] 李相方,隋秀香,唐德钊,等.高温高压气井测试合理工作制度设计理论与方法[J].中国海上油气,2003,15(5):19-32.
- [3] 石军太,李相方,隋秀香,等.高温高压凝析气井测试工作制度及生产压差设计[J].油气井测试,2009,18(1):12-15.
- [4] 徐燕东,许克亮,李江.高温高压凝析气藏的修正等时试井方式及其应用[J].油气井测试,2009,18(4):28-30.
- [5] 苟宏刚,赵继承,秦志保,等.二项式产能方程系数异常情况(B 小于零)分析[J].新疆石油地质,2006,27(2):28-30.
- [6] 刘艳梅.气井二项式产能曲线反向修正方法[J].油气井测试,2011,20(6):17-19.
- [7] 罗明耀.高温高压气井测试中合理生产压差的确定方法[J].江汉石油职工大学学报,2006,19(6):43-46.
- [8] 于日全,马华丽,刘平,等.浅层气井产能资料异常原因分析及修正方法[J].油气井测试,2010,19(3):28-30.
- [9] 姜梅枝.气井二项式产能方程曲线斜率为负值原因分析及方程修正[J].油气井测试,2013,22(4):26-28.
- [10] 汪新光,彭小东,李浩,等.海上高温超压气藏产能评价异常处理[J].科学技术与工程,2014,14(13):39-44.
- [11] 王坤,陈明强,曹宝格,等.气井系统试井异常资料分析及处理方法[J].油气井测试,2008,17(4):29-31.
- [12] 余元洲,张彩,杨丽容,等.不同压力下确定凝析气井二项式产能方程的一种新方法[J].天然气工业,2006,26(3):84-86.
- [13] 郝斐,张公社,程林松,等.携液气井产能方程研究[J].天然气工业,2006,26(6):92-93.
- [14] 熊钰,孙安培,张雅玲,等.凝析气井产能试井解释中的阻塞表皮系数校正法研究[J].特种油气藏,2012,19(4):81-83.
- [15] 陈健,黄炳光,王怒涛,等.变表皮系数在凝析气井产能试井中的应用[J].重庆科技学院学报,2010,12(3):39-41.
- [16] 李小平,李允.气井产能分析新方法[J].天然气工业,2004,24(2):76-78.

(编辑 黄颖)

(上接第16页)

- [10] 黄迎松.特高含水阶段油藏水驱规律研究[J].特种油气藏,2018,25(1):95-99.
- [11] 李正民,孙来喜,邓虎城,等.水驱特征曲线的适用条件研究[J].物探化探计算技术,2012,34(2):143-146.
- [12] 俞启泰.关于如何正确研究和应用水驱特征曲线——兼答《油气藏工程实用方法》一书[J].石油勘探与开发,2000,27(5):122-126.
- [13] 李良政,韩进强,陈据.多种水驱特征曲线法预测可采储量的选值方法[J].新疆石油地质,2017,38(6):719-722.
- [14] 葛家理.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2003:175-206.
- [15] 塔雷克·艾哈迈德.油藏工程手册[M].北京:石油工业出版社,2009:288-330.

(编辑 尹淑容)