

# 致密低渗气藏水平井新的产能评价“一点法”

曹朋亮<sup>1</sup>, 杨小松<sup>2</sup>, 张一果<sup>1</sup>, 孟洁<sup>1</sup>, 李媛<sup>1</sup>, 李登伟<sup>3</sup>

- 1. 中国石油长庆油田分公司第五采气厂 内蒙古乌审旗 017300
- 2. 中国石化石油勘探开发研究院天然气所 北京 100083
- 3. 中国石化国际勘探开发公司南苏丹公司 北京 100029

通讯作者: Email: cpliang\_cq@petrochina.com.cn

项目支持: 长庆油田分公司第五采气厂 2015 年科技研发项目“苏东区块下古气藏动态特征及稳产技术研究”(2015CQ5CKY05)

引用: 曹朋亮, 杨小松, 张一果, 等. 致密低渗气藏水平井新的产能评价“一点法”[J]. 油气井测试, 2019, 28(6): 1-8.

Cite: CAO Pengliang, YANG Xiaosong, ZHANG Yiguo, et al. “Single point” productivity evaluation method for horizontal wells in tight and low permeability gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019, 28(6): 1-8.

**摘要** 针对致密低渗气藏水平井修正等时测试井底流压难稳定、二项式曲线倒转的不足, 依据该气藏水平井修正等时试井的理论, 运用压力叠加原理, 提出该类气藏水平井有效快速产能评价“一点法”。运用该方法对实际水平井修正等时测试资料进行分析, 解释的指数式方程系数为 0.98, 紊流效应极弱; 在气田储层参数范围内分析储层有效渗透率、水平井有效长度、储层有效厚度对水平井紊流效应压降的影响, 发现紊流效应压降在总压降中占比低于 1%, 紊流效应可忽略, 二项式产能方程可简化为层流方程。该“一点法”只需求一个产能方程系数, 较大程度节省测试时间, 可为致密低渗气藏水平井产能评价提供技术支撑。

**关键词** 致密气藏; 水平井; 产能方程; 紊流效应; 试井解释; 修正等时试井

中图分类号: TE353 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.06.001

## “Single point” productivity evaluation method for horizontal wells in tight and low permeability gas reservoirs

CAO Pengliang<sup>1</sup>, YANG Xiaosong<sup>2</sup>, ZHANG Yiguo<sup>1</sup>, MENG Jie<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, LI Dengwei<sup>3</sup>

- 1. No.5 Gas Production Plant of PetroChina Changqing Oilfield Company, Ordos, Inner Mongolia 017300, China
- 2. Natural Gas Institute of Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China
- 3. South Sudan Company of Sinopec International Exploration and Production Corporation, Beijing 100029, China

**Abstract:** The bottom hole flow pressure is difficult to be stabilized and the binomial productivity equation curve inverses for the modified isochronal test of horizontal wells in tight and low permeability gas reservoirs. According to the theoretical basis of modified isochronal test of the horizontal well of the gas reservoir, this paper proposes a new method “one-point method” for effective and rapid productivity evaluation of horizontal wells in gas reservoirs by using the pressure superposition principle. The actual horizontal well modified isochronal test data is analyzed, the exponential equation coefficient is 0.98, and the turbulence effect is very weak by using the new method. The effect of the effective permeability of the reservoir, the effective length of the horizontal well, and the storage on the turbulent effect pressure drop of the horizontal well are analyzed within the gas reservoir parameters. The turbulent effect pressure drop accounts for less than 1% of the total pressure drop, the turbulence effect is negligible, and the binomial productivity equation can be simplified to the laminar flow equation. A capacity equation coefficient is merely needed for the “one point method”. This new method saves test time to a large extent, and can provide technical support for the productivity evaluation of horizontal wells in dense low permeability gas reservoirs.

**Keywords:** tight gas reservoir; horizontal well; productivity equation; turbulence effect; well test interpretation; modified isochronal test

对于致密低渗气藏, 产能测试时, 常常开关井很长时间井底流压也难以达到拟稳定, 有的出现异常资料, 而通常“一点法”和修正等时试井方法是有效的产能评价方法<sup>[1-3]</sup>。其中“一点法”主要是通过

修正等时测试资料解释各井  $\alpha$  系数,再多井算术平均得到气藏通用的  $\alpha$ 。梁斌等<sup>[4]</sup>认为低渗气藏不同区域应该有不同  $\alpha$  值,并应用不同区域的系统测试成果回归得到不同  $\alpha$  并建立了相应的“一点法”公式。韩家新<sup>[5]</sup>认为“一点法” $\alpha$  值与不同类型气井的测试产量高低有关,并回归了  $\alpha$  值和测试产量的关系。胡建国等<sup>[6]</sup>建立了“一点法” $\alpha$  值和  $Kh$  的关系,并提出了利用气井  $Kh$  来确定该气井  $\alpha$  值的产能评价方法。赵继承等<sup>[7]</sup>通过苏里格气田 9 口直井修正等时测试数据分析得到,致密低渗气田  $\alpha$  平均值约为 0.92,远比陈元千提出的  $\alpha$  平均值 0.25 要大<sup>[8-9]</sup>。李跃刚等<sup>[10]</sup>则分析认为,“一点法” $\alpha$  值与气层物性、非均质性、测试时间、测试稳定流压等均有关,这些因素会影响“一点法”的评价准确性。张晶等<sup>[11]</sup>利用川西地区系统试井资料求取了“一点法” $\alpha$  平均值为 0.3,使“一点法”评价结果和二项式评价结果更接近。但在致密低渗气藏修正等时产能测试过程中,井底流压未达到稳定,常常导致二项式曲线反转。张宗林等<sup>[12]</sup>针对低渗气藏直井修正等时测试压力不稳定的特点,提出通过模拟延长测试时间下的流压,来求得每一制度下的稳定流压,进而开展评价。马强<sup>[13]</sup>、李跃刚等<sup>[14-15]</sup>系统分析了低渗气藏直井修正等时试井测试和等时试井测试存在的偏差,并提出了校正方法,但相关理论是建立在直井径向渗流的基础上,和水平井的渗流方式还存在一定差异,难以直接套用。何同均等<sup>[16]</sup>从理论上讨论了特低渗气藏水平井“一点法”系数  $\alpha$  的取值应接近 1,但未深入讨论产能方程紊流效应压降在总压降中所占的比例,也未依据实际井修正等时资料验证该结论。Billiter T. 等<sup>[17]</sup>通过对箱形模型气藏水平井二项式产能方程进行 384 次多变量回归分析,在渗透率小于 1 mD 的情况下,  $n$  趋近于 1,但该方法缺乏相应的理论依据。本次笔者拟在系统讨论致密低渗气藏水平井修正等时试井和“一点法”试井的理论依据,针对修正等时测试压力难以达到拟稳定情况,提出水平井修正等时测试新的解释方法,并用实际现场测试数据加以验证;在系统讨论致密低渗气藏不同储层参数条件下水平井紊流效应都极弱的情况下,提出致密低渗气藏水平井新的产能评价“一点法”。

## 1 致密低渗气藏水平井修正等时试井理论基础

对修正等时试井的非延时测试流动阶段,如果

每个开关井时间  $t$  较短,如 1 d 或 0.5 d,则气体的流动会处在一个主要的流动阶段,通常水平井处于垂向径向流。

其压力降落方程<sup>[18]</sup>为

$$p_{wf}^2 = p_R^2 - \frac{1.466 \times 10^{-2} q_{sc} \mu Z T}{\sqrt{K_h K_z} L} \left[ \lg \frac{\sqrt{K_h K_z} t}{\phi \mu C_t r_w^2} - 0.9077 + 0.87 S_A \right] \quad (1)$$

式中:  $p_R$  为地层压力, MPa;  $p_{wf}$  为井底流压, MPa;  $q_{sc}$  为产气量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $h$  为气层厚度, m;  $L$  为水平井井段长度, m;  $r_w$  为井眼半径, m;  $\mu$  为气体黏度, mPa·s;  $K_h$  为水平渗透率, mD;  $K_z$  为垂直渗透率, mD;  $T$  为气藏温度, K;  $Z$  为气体偏差因子;  $S_A$  为表皮系数;  $\phi$  为孔隙度;  $C_t$  为综合压缩系数, MPa<sup>-1</sup>。

考虑气藏非达西效应的影响,则总表皮系数  $S'$  可表达为由渗透率变化引起和非达西效应引起两部分表皮之和,即

$$S' = S_A + D q_{sc} \quad (2)$$

式中:  $D$  为高速非达西系数, m/d。

$$p_{wf}^2 = p_R^2 - \frac{1.466 \times 10^{-2} q_{sc} \mu Z T}{\sqrt{K_h K_z} L} \left[ \lg \frac{\sqrt{K_h K_z} t}{\phi \mu C_t r_w^2} - 0.9077 + 0.87 (S_A + D q_{sc}) \right] \quad (3)$$

则可将上式简化成二项式,即

$$\Delta p^2 = A(t) q_{sc} + B q_{sc}^2 \quad (4)$$

从上式中可以看出,  $A(t)$  是时间的函数,而  $B$  与时间无关。因此,不同的产量在相同的生产时间具有相等的  $A(t)$ 。以  $q_{sc}$  为横坐标,作  $\Delta p^2/q_{sc} \sim q_{sc}$  的关系曲线,得一条直线。

这就是致密低渗气藏水平井等时试井的理论基础。而修正等时试井是等时试井的近似,上面的推导依然是修正等时试井的理论基础。其形式和直井产能修正等时试井理论完全一样,因此,致密低渗气藏水平井产能测试可采用修正等时试井,且解释方法和直井一样,可用指数式和二项式解释。

## 2 水平井修正等时试井产能分析的改进方法

修正等时试井作为等时试井的近似,主要在两方面和等时试井存在不同:①关井时压力恢复时间短,压力未达到稳定,更未达到原始地层压力;②由于压力恢复时未到达原始地层压力,在开井时井底

流压比等时试井下降得更多,与等时试井造成偏差,是导致产能分析二项式倒转,无法解释的一个重要原因。

为此,提出改进的修正等时试井产能资料分析方法。

(1) 假定关井时压力恢复到压力稳定,为原始地层压力  $p_i$ ;

(2) 对每一测试工作制度开井时的井底流压进行校正。

当为等时试井时,每一开井井底流压为

$$p_R^2 - p_{wf(is1)}^2 = A(t)q_{sc1} + Bq_{sc1}^2 \quad (5)$$

$$p_R^2 - p_{wf(ism)}^2 = A(t)q_{scm} + Bq_{scm}^2 \quad (6)$$

$m = 2, 3, 4$

式中: $p_{wf(is1)}$  为等时试井一开井底流压,MPa; $p_{wf(ism)}$  为等时试井的  $m$  开井底流压,MPa; $q_{scm}$  为  $m$  开生产产量, $m^3/d$ 。

而对于修正等时试井,运用压力叠加原理,有

$$p_R^2 - p_{wf(is1)}^2 = A(t)q_{sc1} + Bq_{sc1}^2 \quad (7)$$

$$p_R^2 - p_{wf2}^2 = A(3t)q_{sc1} + Bq_{sc1}^2 - A(2t)q_{sc1} - Bq_{sc1}^2 + A(t)q_{sc2} + Bq_{sc2}^2 \quad (8)$$

式中: $p_{wf1}$ ,  $p_{wf2}$  分别为修正等时试井时第一个、第二个开井生产时的井底流压,MPa。

因而有:

$$p_{wf(is2)}^2 = p_{wf2}^2 + mq_{sc1} \lg\left(\frac{3}{2}\right) \quad (9)$$

$$p_{wf(is3)}^2 = p_{wf3}^2 + mq_{sc1} \lg\left(\frac{5}{4}\right) + mq_{sc2} \lg\left(\frac{3}{2}\right) \quad (10)$$

$$p_{wf(is4)}^2 = p_{wf4}^2 + mq_{sc1} \lg\left(\frac{7}{6}\right) + mq_{sc2} \lg\left(\frac{5}{4}\right) + mq_{sc3} \lg\left(\frac{3}{2}\right) \quad (11)$$

式中: $m$  为叠加分析的斜率(可以由叠加分析得到)。

因此,改进后的分析方法对应的产量压力序列:

$$(q_{sc1}, p_R^2 - p_{wf1}^2),$$

$$\left(q_{sc2}, p_R^2 - p_{wf2}^2 - mq_{sc1} \lg\left(\frac{3}{2}\right)\right),$$

$$\left(q_{sc3}, p_R^2 - p_{wf3}^2 - mq_{sc1} \lg\left(\frac{5}{4}\right) - mq_{sc2} \lg\left(\frac{3}{2}\right)\right),$$

$$\left(q_{sc4}, p_R^2 - p_{wf4}^2 - mq_{sc1} \lg\left(\frac{7}{6}\right) -$$

$$mq_{sc2} \lg\left(\frac{5}{4}\right) - mq_{sc3} \lg\left(\frac{3}{2}\right)\right)$$

根据压力叠加原理,有  $p_{ws1} = p_R$ , 对于测试序列

的第一个压力恢复段,有

$$p_R^2 - p_{ws2}^2 = A(2t)q_{sc1} + Bq_{sc1}^2 - A(t)q_{sc1} - Bq_{sc1}^2 \quad (12)$$

$$p_R^2 - p_{ws2}^2 = m\left(q_{sc1} \lg\left(\frac{2}{1}\right)\right) \quad (13)$$

式中: $p_{ws1}$  为修正等时试井一关井底流压,MPa。

同理可得:

$$p_R^2 - p_{ws3}^2 = m\left[q_{sc1} \lg\left(\frac{4}{3}\right) + q_{sc2} \lg\left(\frac{2}{1}\right)\right] \quad (14)$$

$$p_R^2 - p_{ws4}^2 = m\left[q_{sc1} \lg\left(\frac{6}{5}\right) + q_{sc2} \lg\left(\frac{4}{3}\right) + q_{sc3} \lg\left(\frac{2}{1}\right)\right] \quad (15)$$

$$p_R^2 - p_{ws5}^2 = m\left[q_{sc1} \lg\left(\frac{8}{7}\right) + q_{sc2} \lg\left(\frac{6}{5}\right) + q_{sc3} \lg\left(\frac{4}{3}\right) + q_{sc4} \lg\left(\frac{2}{1}\right)\right] \quad (16)$$

联立求解线性方程式(13)~(16),可以求得  $m$ ;也可以利用四个方程式中和  $m$  相关的四个数据点作图,利用线性拟合的方式求得  $m$ 。

### 3 水平井修正等时资料的处理及分析

选作实例分析的水平井是位于国内鄂尔多斯盆地某致密低渗气田下石盒子组完钻水平井,该气田开展了水平井低密度、低固相颗粒钻井实验,共完钻 5 口水平井。由于采用的是低密度、低固相颗粒的钻井液,储层基本未受污染,钻完井后全部试气成功。其中的 Hori-1 水平井进行了修正等时测试,其产量压力关系如图 1 所示。

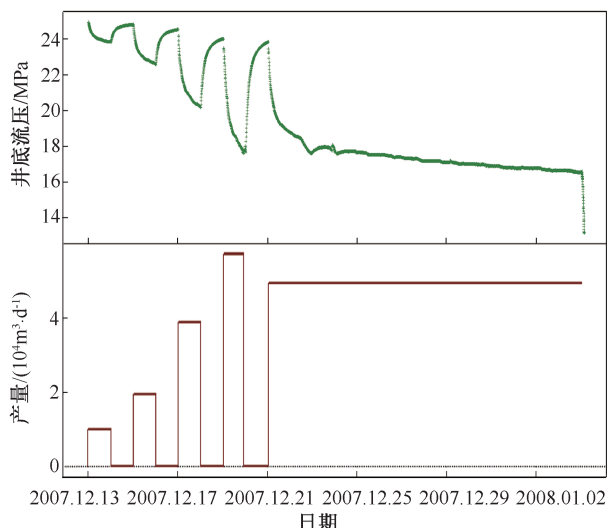


图 1 Hori-1 井修正等时测试压力、产量曲线

Fig.1 Pressure and production curve of modified isochronal test in Hori-1 Well

该井一开到四开生产时间为 1 d,延时测试时间

为 14 d。根据水平井流动阶段的判别方法<sup>[18]</sup>,判断水平井垂向径向流的延续时间为 22.5 h。因此,在一开到四开阶段水平井流动主要处于垂向径向流,可用本文提出的方法进行分析。

用常规的和改进的二项式和指数式方法,对两口井修正等时数据进行了分析(图 2-5)。

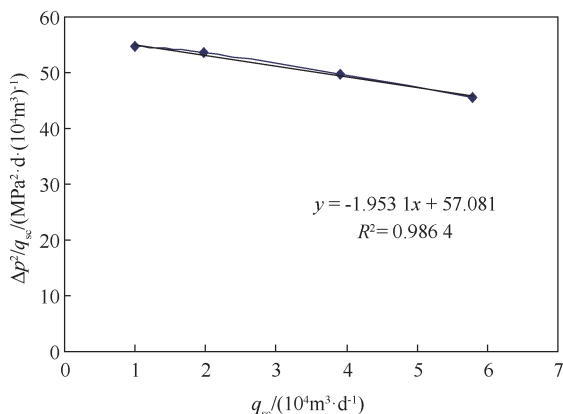


图 2 Hori-1 井二项式曲线

Fig.2 Binomial curve of Hori-1 Well

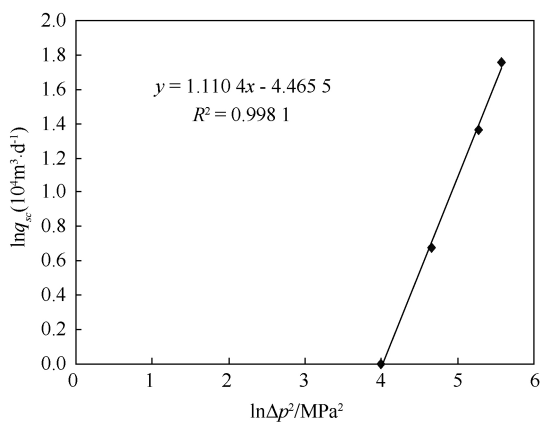


图 3 Hori-1 井指数式曲线

Fig.3 Exponential curve of Hori-1 Well

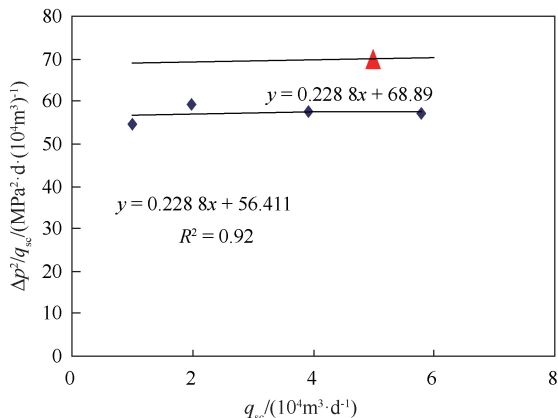


图 4 Hori-1 井二项式重新解释结果

Fig.4 Reinterpretation results by binomial equation of Hori-1 Well

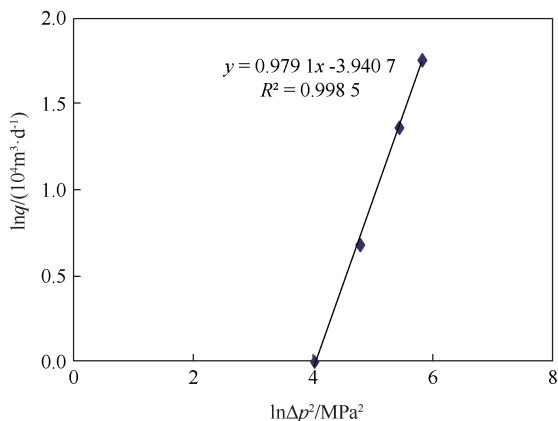


图 5 hori-1 井指数式重新解释结果

Fig.5 Reinterpretation results by exponential equation of Hori-1 Well

用常规的方法分析,发现二项式反转、指数式方程  $n > 1$ ;运用改进的分析方法分析后,Hori-1 水平井的  $\Delta p^2/q_{sc} \sim q_{sc}$  关系曲线基本为一水平线,解释的紊流系数  $B$  为 0.228 8,得到二项式方程为

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = 68.89 q_{sc} + 0.228 8 q_{sc}^2 \quad (17)$$

而 Hori-1 井指数式解释的系数  $n = 0.979 1$ ,指数式方程为

$$q_{sc} = 0.016 (p_R^2 - p_{wf}^2)^{0.98} \quad (18)$$

两种方法解释的绝对无阻流量分别为  $8.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $8.74 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,该井试采时以近 1/3 绝对无阻流量配产,即  $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  生产,稳产时间 3 年左右,达到了开发方案设计的稳产和供气要求,表明解释的绝对无阻流量能作为气藏配产的依据和基础。

## 4 致密低渗气藏水平井紊流效应分析

求得的产能方程式(18)表明,气体流动的非达西紊流效应很弱,可完全近似为线性达西渗流。为此,进一步讨论了致密低渗气藏水平井紊流非达西效应的强弱,以期得出致密低渗气藏裸眼完井水平井产能紊流效应弱的内在机理。直井中紊流非达西效应的描述可参考著作<sup>[19-21]</sup>,与直井紊流数学描述同理,可导出水平井中的考虑紊流效应的稳定产能二项式<sup>[22]</sup>表达式,即

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = A q_{sc} + B q_{sc}^2 \quad (19)$$

$$B = \frac{2.282 \times 10^{-21} \beta \gamma_g Z T}{r_w^2 L^2} \quad (20)$$

$$A = \left\{ \left[ \ln \left( \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right) \right]^2 + \right.$$



$$\frac{\beta h}{L} \ln \left( \frac{(\beta h/2)^2 + (\beta \delta)^2}{\beta \pi h r_w/2} \right) \Big] (\mu Z T) \Big\} / 774.6 K_h h \quad (21)$$

式中:  $A$  为层流系数,  $\text{MPa}^2 \cdot \text{d}/(10^4 \text{m}^3)$ ;  $B$  为紊流系数,  $\text{MPa}^2 \cdot \text{d}^2/(10^8 \text{m}^6)$ ;  $\beta$  为非均质系数, 无因次。

紊流效应主要受每米水平井筒气体流入量的影响。分析不同渗透率、不同水平井有效长度、不同储层有效厚度等主要影响因素<sup>[23-25]</sup>对紊流效应、水平井“一点法”系数  $\alpha=A/(A+BQ_{\text{AOF}})$  的影响, 可用  $BQ_{\text{sc}}^2/(BQ_{\text{sc}}^2+AQ_{\text{sc}})$  来表示紊流非达西效应损耗的压降能量比例, 如图 6-9 所示。

从图 6-7 可以看出, 随着储层有效渗透率的增大, 水平井绝对无阻流量增大, 紊流效应压降占比增大, 介于 0.006~0.020, 达西流压降占比则为 0.980~0.994, 水平井“一点法”系数  $\alpha$  则为 0.980~0.994。可以看出, 对致密低渗气藏水平井, 紊流效应压降为一个极小量, 完全可简化为达西线性流, 确定的绝对无阻流量也远小于工程计算容许误差 0.05; 尤其该致密低渗气田储层渗透率主值区间介于 0.01~0.15 mD, 紊流效应压降占比小于 0.01, 更是远小于工程计算容许误差 0.05。

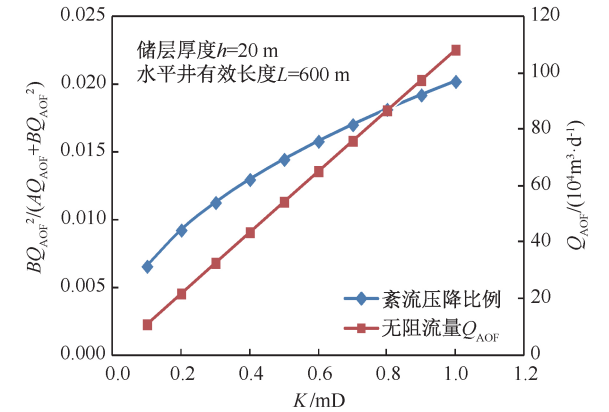


图 6 水平井紊流压降随有效渗透率变化曲线  
Fig.6 Horizontal well turbulent pressure drop varies with effective permeability curve

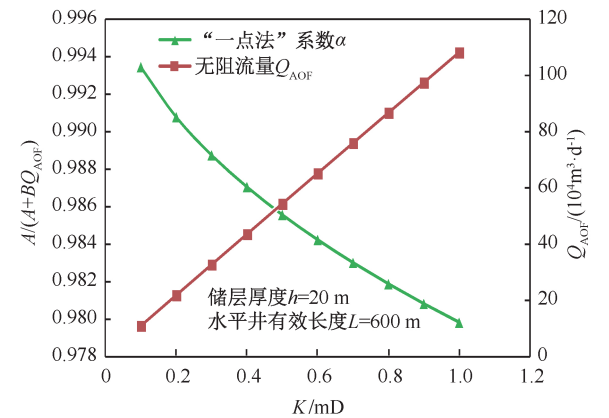


图 7 “一点法”系数  $\alpha$  随有效渗透率变化曲线  
Fig.7 “One-point” coefficient  $\alpha$  varies with effective permeability curve

从图 8-9 可以看出, 在气田储层主值渗透率 0.1 mD 和水平井单层钻遇主值厚度 20 m 的情况下, 随着水平井有效长度的增加, 由 450 m 增加到 950 m, 气井绝对无阻流量增大, 紊流压降占比不断减小, 但都小于 0.01; “一点法”系数也不断减小, 但基本都接近于 1。

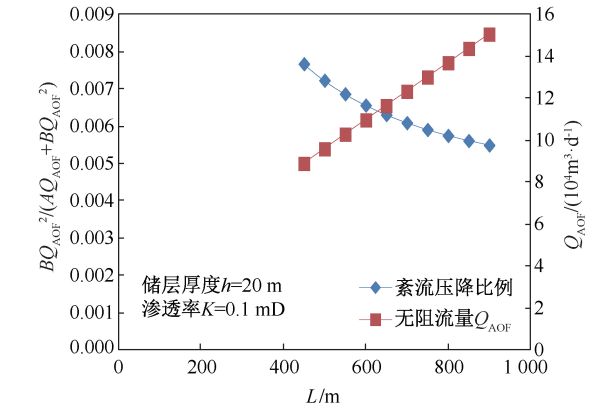


图 8 水平井紊流压降随水平井长度变化曲线  
Fig.8 Horizontal well turbulent pressure drop varies with the horizontal well length curve

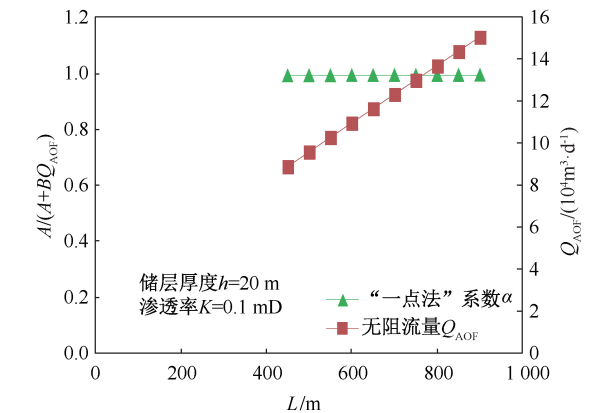


图 9 “一点法”系数  $\alpha$  随水平井长度变化曲线  
Fig.9 “One-point” coefficient  $\alpha$  varies with the horizontal well length curve

水平井紊流压降随储层厚度变化曲线及“一点法”系数  $\alpha$  随储层厚度变化曲线如图 10-11 所示。

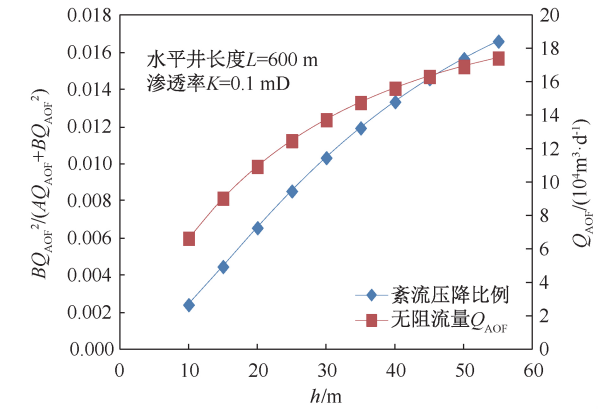


图 10 水平井紊流压降随储层厚度变化曲线  
Fig.10 Horizontal well turbulent pressure drop varies with the reservoir thickness curve

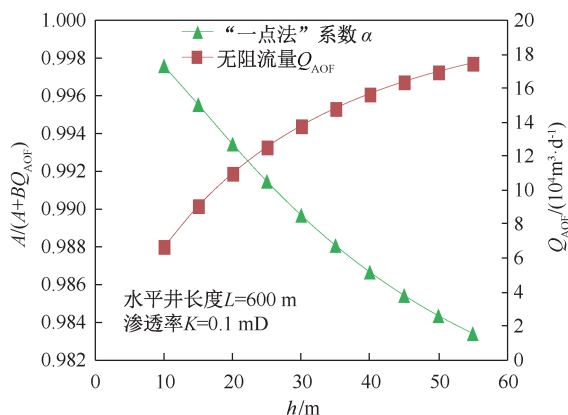


图 11 “一点法”系数  $\alpha$  随储层厚度变化曲线

Fig.11 “One-point” coefficient  $\alpha$  varies with the reservoir thickness curve

从图 10-11 也可以看出,在水平井钻遇气层有效长度为 600 m 和渗透率为 0.1 mD 的情况下,随着储层厚度从 10 m 增加到 55 m,紊流压降占比由 0.006 增加到 0.015,“一点法”系数由 0.998 减小到 0.984。可以看出,紊流效应极弱,可近似为达西线性渗流。

综上所述,紊流非达西效应在致密低渗水平井产能分析中基本可以忽略不计。这也解释了为什么修正等时试井指数式方法解释的系数接近于 1,致密低渗气藏水平井产能方程可近似简化为线性达西渗流的情形。

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = Aq_{sc} \quad (22)$$

因此,Hori-1 水平井应用延时流动段就可以求出产能方程系数  $A$ 。

应用延时流动段,对于 Hori-1 井,求出产能方程,即

$$q_{sc} = 0.0145(p_R^2 - p_{wf}^2) \quad (23)$$

运用简化的方程计算 Hori-1 井绝对无阻流量为  $9.06 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,与二项式方程分析的结果  $8.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  相差 3.3%,十分接近。这里需要说明的是,这 3.3% 包括修正等时开关井测试时不稳定和“一点法”方法简化后的综合偏差。

## 5 致密低渗气藏水平井产能简易评价方法

由于对该致密低渗气田,有效渗透率很小,在 0.01~0.50 mD 之间,产能方程可以简化为层流线性达西渗流的形式,产能的确定主要在于产能方程系数  $A$ 。因此,测一个稳定流动点就能确定水平井的产能,从而提出致密低渗气藏水平井产能测试的“一点法”。该“一点法”和通常意义上的“一点法”

不同。该“一点法”只需求一个产能方程系数  $A$ ,不需要通过大量水平井修正等时试井资料来回归“一点法”公式,能较大程度的节省测试时间,也在一定程度上避免了修正等时试井方法自身误差和修正等时曲线确定的  $\alpha$ ,再多井算术平均求  $\alpha$  带来的误差。

下面来讨论致密低渗气藏水平井“一点法”的测试时间和测试产量。

### 5.1 测试产量的确定

根据水平井不稳定渗流的基本理论,对水平井“一点法”试井过程进行模拟,根据模拟结果按照“一点法”分析绝对无阻流量。本次模拟采用的基本物性参数来自于该气藏实际气井的测井和不稳定试井解释等的成果。地层压力 23.898 MPa,有效渗透率 0.033 mD,水平段长 870.8 m,气层厚 8 m,垂向渗透率/水平渗透率 0.06,孔隙度 0.08。“一点法”试井过程模拟结果见表 1。

表 1 “一点法”试井过程模拟结果

Table 1 Simulation results of “One point” well test process

测试产量	地层压力/ MPa	井底流压/ MPa	绝对无阻流量/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
1.0	23.898	21.650 5	5.578 910
2.0	23.898	19.280 6	5.729 109
3.0	23.898	16.726 7	5.881 069
3.8	23.898	14.477 4	6.003 095
4.0	23.898	13.874 8	6.033 892
5.0	23.898	10.463 4	6.185 824
6.0	23.898	5.494 0	6.334 808
6.4	23.898	0.100 0	6.400 112

从表 2 可以看出,当井底流压降到 0.1 MPa 时,水平井对应的最终的绝对无阻流量为  $6.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。当水平井测试产量大于绝对无阻流量的 60% 时,即大于  $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  时,测试结果和实际绝对无阻流量较接近。因此,水平井“一点法”测试产量应不小于绝对无阻流量的 60%,可为绝对无阻流量的 60%。水平井绝对无阻流量是未知的,由于开发部署水平井时,水平井周围地质情况已较清楚,因此,可根据周围直井实测地层物性参数、直井泄气半径等,依据水平井 Joshi 产能公式,计算水平井绝对无阻流量,再定水平井绝对无阻流量的 60% 为测试产量。

### 5.2 产能测试时间的确定

由于致密低渗气藏无保持供给边界压力的机制,真正稳定的流压是不可能达到的。合理的测试

时间是在某一测试产量下,井底流压近似达到拟稳定<sup>[26]</sup>。当测试产量为  $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  时,该井井底流压随时间的变化如图 12 所示。

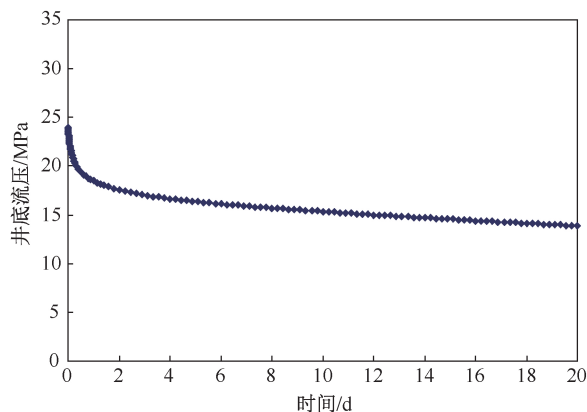


图 12 井底流压变化曲线

Fig.12 Bottom flow pressure curve

从图 12 可以看出,该井的合理测试时间应不小于 10 d,可选最小时间 10 d。

## 6 结论

(1) 针对致密低渗气藏水平井修正等时测试,每个开关井制度都难以达到稳定导致二项式曲线反转的不足,发展了一种新的水平井修正等时试井资料分析方法,并对实际致密低渗气藏水平井的修正等时测试资料进行了分析,发现解释的指数式方程系数  $n$  为 0.98,紊流效应极弱。

(2) 在气田储层参数范围内分析了有效渗透率、水平井有效长度、储层有效厚度对水平井紊流效应压降占比的影响,发现紊流效应压降占比介于 0.6% ~ 2.0%,由于储层有效渗透率主要低于 0.15 mD,紊流效应压降在总压降中占比低于 1%,完全可以忽略不计,二项式产能方程可简化为只有一个产能方程系数  $A$  的达西线性方程。

(3) 提出了致密低渗气藏裸眼完井水平井快速产能评价的新“一点法”,“一点法”系数可取为 1;并比较了和通常意义上的“一点法”的不同,给出了致密低渗气藏水平井“一点法”测试产量和测试时间的确定方法。

**致谢:**感谢长庆油田采气五厂技术管理科孙振、张林两位高级工程师的悉心指导和帮助。

## 参考文献

[1] 秦通社. 气井“一点法”试气技术[J]. 西部探矿工程, 2009,21(10):51-54.

QIN Tongshe. Gas testing technology of “one point” in gas

well [J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21 (10):51-54.

[2] 朱文娟. 修正等时试井在西湖凹陷低渗储层中的应用[J]. 油气井测试,2017,26(5):28-30.

ZHU Wenjuan. Application of Modified Isochronal Testing in the Low Permeability reservoirs of Xihu Sag [J]. Well Testing, 2017,26(5):28-30.

[3] 张慧宇. 致密气藏试井异常资料产能计算新方法[J]. 油气井测试,2019,28(2):1-5.

ZHANG Huiyu. A new method of productivity calculation for wells with abnormal testing data in tight gas reservoir [J]. Well Testing, 2019,28(2):1-5.

[4] 梁斌,谭先红,焦松杰,等. 东海低孔低渗气田气井压裂投产后“一点法”产能方程[J]. 油气井测试,2018,27(2):73-78.

LIANG Bin, TAN Xianhong, JIAO Songjie, et al. “Single-point” productivity equation for fractured gas wells in low-porosity and low-permeability reservoirs, East China Sea [J]. Well Testing, 2018,27(2):73-78.

[5] 韩家新. 动态“一点法”产能方程在气藏开发中的应用[J]. 天然气技术与经济,2015,9(2):29-30,36.

HAN Jiaxin. Application of dynamic one-point-method deliverability equation to reservoir development [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2015,9(2):29-30,36.

[6] 胡建国,张宗林,张振文. 气田一点法产能试井资料处理新方法[J]. 天然气工业, 2008,28(2):111-113.

HU Jianguo, ZHANG Zonglin, ZHANG Zhenwen. A new method on processing the data from one-point deliverability test in gas fields [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(2):111-113.

[7] 赵继承,苟宏刚,周立辉,等. “单点法”产能试井在苏里格气田的应用[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3):63-65,69.

ZHAO Jicheng, GOU Honggang, ZHOU Lihui, et al. Application of “one point” deliverability testing in Sulige gas field [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006,13(3):63-65,69.

[8] 陈元千,漆雕良. “一点法”在陕甘宁大气田的应用[J]. 油气井测试,1993,2(4):15-20.

CHEN Yuanqian, QI Diaoliang. Application of “one point” in Shanganning gas field [J]. Well Testing, 1993,2(4):15-20.

[9] 陈元千. 实用油气藏工程方法[M]. 第1版. 北京:石油工业出版社,1998:32-45.

[10] 李跃刚,郝玉鸿,范继武. “单点法”确定气井无阻流量的影响因素分析[J]. 海洋石油,2003,23(1):36-41.

LI Yaogang, HAO Yuhong, FAN Jiwu. Factors analysis about non-resistance flow of gas well defined by “spot measurement” [J]. Offshore Oil, 2003,23(1):36-41.

[11] 张晶,牟小清,邱玲. 川西深层“一点法”产能试井公式的校正[J]. 油气井测试,2011,20(5):19-20.

ZHANG Jing, MU Xiaoqing, QIU Ling. Correction for

- well testing formula of “one point” production testing in Chuanxi deep layer [J]. 2011,20(5):19-20.
- [12] 张宗林,张振文,胡建国. 低渗透气藏修正等时试井资料处理新方法[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(4):481-483.
- ZHANG Zonglin, ZHANG Zhenwen, HU Jianguo. A new method for processing of modified isochronal well test data in low permeability gas reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006,27(4):481-483.
- [13] 马强. 低渗气田修正等时试井分析的改进方法[J]. 油气井测试,2011,20(5):24-26,29.
- MA Qiang. Improvement of modified isochronal test methods for low permeability gas field [J]. Well Testing, 2011,20(5):24-26,29.
- [14] 李跃刚,范继武,唐乐平,等. 修正等时试井技术在长庆气田的应用与发展[J]. 天然气工业,2002,22(6):68-71.
- LI Yuegang, FAN Jiwu, TANG Leping, et al. Application and expansion of modified isochronal testing technique in Changqing gas field [J]. Natural Gas Industry, 2002,22(6):68-71.
- [15] 李跃刚. 不成功的修正等时试井补救方法[J]. 油气井测试,1996,5(4):33-36,46.
- LI Yuegang. Remedial method of unsuccessful correction of isochronic well testing [J]. Well Testing, 1996,5(4):33-36,46.
- [16] 何同均,李颖川. 特低渗气藏水平井一点法产能测试理论分析[J]. 钻采工艺,2010,33(1):40-42,46.
- HE TongJun, LI Yingchuan. The oretical analysis of single-point deliverability testing of horizontal gas wells in low permeability gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2010,33(1):40-42,46.
- [17] BILLITER T, LEE J, CHASE R. Dimensionless inflow performance relationship curve for unfractured horizontal gas wells [J]. SPE 72361, 2001.
- [18] ODEH A S, BABU D K. Transient flow behavior of horizontal wells, pressure drawdown, and buildup analysis [J]. SPE Formation Evaluation, 1990,5(1):7-15.
- [19] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2000:23-30.
- [20] 张雁,乔宏林. 湍流系数  $D$  的几种计算公式及应用[J]. 油气井测试,2000,9(1):7-11.
- ZHANG Yan, QIAO Honglin. Several calculation formulas for turbulence coefficient  $D$  and their application [J]. Well Testing, 2000,9(1):7-11.
- [21] 李跃刚,范纪武. 修正等时试井确定的产能方程系数 ( $B$ ) 变化规律研究[J]. 油气井测试, 1995, 4(4):61-64.
- LI Yuegang, FAN Jiwu. Study on variation law of productivity equation coefficient ( $B$ ) determined by modified isochronic [J]. Well Testing, 1995,4(4):61-64.
- [22] JOSHI S D. Augmentation of well production wit h slant and horizontal wells [C]. SPE 155375, 1988.
- [23] 宋黎明,张晓岗,李广轩,等. 基于试井理论的水平井试井储层描述[J]. 油气井测试,2014,23(5):36-39.
- SONG Liming, ZHANG Xiaogang, LI Guangxuan, et al. Description based on well testing theory of horizontal well reservoir [J]. Well Testing, 2014,23(5):36-39.
- [24] 赵钊,李治平,赖枫鹏,等. 致密气压裂水平生产异常井的产能测试影响因素分析[J]. 油气井测试,2016,25(1):28-29.
- ZHAO Zhao, LI Zhiping, LAI Fengpeng, et al. Influence factor analysis of abnormal production on testing stage for tight gas of fractured horizontal well [J]. Well Testing, 2016,25(1):28-29.
- [25] 李波,贾爱林,何东博,等. 苏里格气田强非均质性致密气藏水平井产能评价[J]. 天然气地球科学,2015,26(3):539-549.
- LI Bo, JIA Ailin, HE Dongbo, et al. Productivity evaluation of horizontal wells in Sulige tight gas reservoir with strong heterogeneity [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3):539-549.
- [26] 赵钊,李治平,赖枫鹏,等. 致密气压裂水平井“一点法”合理测试时间研究[J]. 油气井测试,2015,24(1):1-3.
- ZHAO Zhao, LI Zhiping, LAI Fengpeng, et al. Study of single-point testing time for tight gas of fractured horizontal wells [J]. Well Testing, 2015,24(1):1-3.

编辑 穆立婷

第一作者简介:曹朋亮,男,1986年出生,2009年毕业于大庆石油学院资源勘查专业,主要从事致密砂岩气藏开发、气田动态管理工作。电话:0477-7226294,15149457992;Email:cpiang\_cq@petrochina.com.cn。通信地址:内蒙古乌审旗长庆油田第五采气厂地质研究所,邮政编码:017300。