

考虑多因素的低渗透气藏压裂井产能公式分析

尹鹏¹, 魏俊¹, 张志军¹, 吴东明², 吴慎渠¹, 徐浩¹, 徐良¹, 华科良¹

(1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘要: 为了更加准确地预测低渗透气藏压裂井产能, 应综合考虑产能影响参数的影响。研究表明: 低渗透气藏启动压力梯度与储层平均渗透率呈幂函数关系, 介质变形作用使得低渗透储层应力敏感效应较为严重; 滑脱效应使得气体渗流阻力减少, 气井产能增大。因此基于保角变换原理, 建立了考虑应力敏感、滑脱效应、变启动压力梯度因素的压裂井产能预测模型, 并研究了各因素对气井产能的影响。结果表明: 随着应力敏感系数的增大, 气井产量下降, 且对低井底流压影响更大; 井底流压越低, 气井产量随滑脱系数的增大而变化的越明显; 启动压力梯度系数在一定范围内对气井产能的影响较大。因此, 对于低渗透气藏压裂井产能的预测, 需要考虑多因素对气井产能的影响。

关键词: 低渗气藏; 压裂井; 产能方程; 变启动压力梯度; 应力敏感; 滑脱效应

中图分类号: TE357.1

文献标识码: A

Analysis of low permeability gas reservoir fracturing well productivity equation considering multi-factors

Yin Peng¹, Wei Jun¹, Zhang Zhijun¹, Wu Dongming², Wu Shenqu¹, Xu Hao¹, Xu Liang¹ and Hua Kelian¹

(1. CNOOC EnerTech-Drilling and Production Co., Tianjin 300452, China;

2. CNOOC Energy Technology and Services Limited Tianjin Branch, Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In order to accurately predict the well capacity in the fracture of the low permeability gas reservoir, it is necessary to consider the multi-factors. The studies show that the relation between the threshold pressure gradient and the average reservoir permeability of the low permeability gas reservoir is the power function. The deformation of the media function makes the stress sensitive effect more serious, and the slippage effect makes the gas seepage resistance down and increases the well productivity. According to the conformal transformation theory, we established a prediction model of fracturing well productivity, which considered the stress sensitivity, the slippage effect and the changed threshold pressure gradient, and studied the effects on the productivity. The results showed that, with the increase of the stress sensitivity coefficient, the gas well output decreases, and the pressure of the low well bottom flow is more affected. The lower the flow pressure of the bottom hole is, the more obvious the gas well output changes with the increase of slip coefficient. The threshold pressure gradient factors greatly affect the well productivity in a certain range. Therefore, it is necessary to consider the influence of many factors on the gas well productivity in the prediction of the production capacity of the low permeability gas reservoir.

Key words: low permeability gas reservoir, fracturing well, productivity equation, variable threshold pressure gradient, stress sensitivity, slippage effect

低渗透气藏孔隙度和渗透率低, 孔隙结构复杂, 导致其一般无自然产能或低产, 需要水力压裂和水平井技术才能进行经济开采。而大量研究表明, 低渗透气藏介质渗流时具有启动压力梯度, 只有在外加压力梯度大于启动压力梯度时, 流体才可以流动^[1-2]; 而气体在多孔介质中流动时存在滑脱效应^[3-4],

且低渗透气藏介质变形对气藏产量影响较大。因此分析低渗气藏产能时, 需要综合考虑启动压力梯度、应力敏感性、滑脱效应等因素的影响^[5-6]。实验研究表明, 对于不同气藏的流体和岩石, 启动压力梯度与储层平均渗透率有关^[7-8]。因此在建立公式时, 需考虑渗透率对启动压力梯度的影响。李治平等^[9]在

收稿日期: 2017-03-13。

第一作者简介: 尹鹏(1988—), 男, 工程师, 油藏动态分析及提高采收率研究。

Forchheimer 二次方程的基础上,提出了考虑启动压力梯度的三项式产能方程,并用最优化方法对产能测试资料进行处理。张烈辉等^[10]在研究低压、低渗气井产能时,提出了气体滑脱效应的影响,并建立了考虑滑脱效应的低渗气井产能方程。刘洋等^[11]提出了考虑启动压力梯度和应力敏感性的气井产能预测模型及数值模型,并运用数值离散方法进行求解。张新等建立了应力敏感储层与变启动压力梯度的低渗气井产能方程^[12]。以上学者建立的产能方程存在共同的缺点,即考虑的影响气井产能的参数过于单一。聂向荣、熊健^[13-14]虽然针对低渗透气藏建立了考虑启动压力梯度、滑脱效应与应力敏感效应的直井产能方程,但是假设中认为启动压力梯度为常数,不随渗透率发生变化,且仅对直井产能进行研究。该文所建立的低渗气藏压裂井(直井)产能公式,综合考虑应力敏感效应、滑脱效应及变启动压力梯度对压裂气井产能的影响,并利用保角变换推导出压裂井(直井)的产能预测模型,对参数敏感性进行了分析,对低渗气藏的合理开发具有一定的指导意义。

1 气井产能方程

1.1 模型假设

为便于模型的建立与求解,作如下假设^[15]:气井压裂后形成垂直裂缝,且对称分布于气井的两边;裂缝剖面为椭圆形,并等于油层厚度;裂缝宽度相对于气藏的供给半径非常小,在进行保角变换时可忽略不计;裂缝内导流能力为无限导流;气藏及裂缝内均为单相流动,且地层中的气体流动符合达西定律;忽略毛细管力、重力对渗流的影响;渗流过程为等温渗流。

1.2 渗流速度的建立

在 z 平面上建立算 $x-y$ 坐标系,经过保角变换转化为 w 平面上的 $\zeta-\eta$ 坐标系,如图1所示。

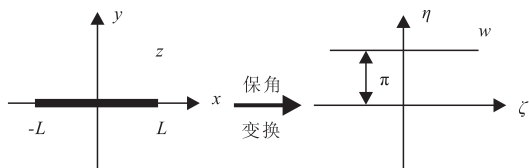


图1 裂缝井保角变换示意图

Fig. 1 Fracture well conformal transformation graph

取变换函数为^[16]:

$$z=Lch\zeta \quad (1)$$

变换后,长为 $2L$ 的裂缝变为宽度为 π 的排液坑道, z 平面地层变换为 w 平面带宽为 π 的无限大地层。即 z 平面裂缝井的流动变换为 w 平面单向流动。

将 w 平面单向稳定流渗流速度转换为地面标况下的速度可表述为:

$$v = \frac{q}{2\pi h} = \frac{q_{sc} P_{sc} ZT}{2\pi h P T_{sc} Z_{sc}} \quad (2)$$

根据稳态渗流理论的运动方程,同时考虑启动压力梯度表述为:

$$v = \frac{k}{\mu} \left(\frac{dP}{dr} - \lambda \right) \quad (3)$$

低渗储层由于存在应力敏感特征^[17-19],根据文献调研可知渗透率随地层压力的关系可表示为:

$$k = k_0 \exp[-\alpha(P_0 - P)] \quad (4)$$

气体在低压、低渗气藏中渗流时,管壁处气体分子速度不为零,气体渗透率与压力倒数成正比,这种现象称为滑脱现象^[20]。滑脱现象导致气体渗流曲线在早期偏离达西线性渗流曲线,使气体的实际渗透率增加。根据文献^[21]考虑滑脱效应的气测渗透率的数学表达式为:

$$k = k_0 \left(1 + \frac{b}{P} \right) \quad (5)$$

低渗透气藏中,流体的基本渗流规律不符合达西定律,渗流时只有在外加压力梯度大于启动压力梯度时,流体才发生流动过程^[2]。通过文献调研^[22-24]表明,实际气藏中的启动压力梯度并非常数,而是与储层渗透率有关,其对应关系可用下式表示:

$$\lambda = ak^{-m} \quad (6)$$

由此可以得到考虑应力敏感、滑脱效应和变启动压力梯度的渗流方程为:

$$\frac{dP}{dr} - ak^{-m} = \frac{\mu}{k_0 \left(1 + \frac{b}{P} \right) \exp[-\alpha(P_0 - P)]} v \quad (7)$$

式中: v 为裂缝中气体流速, m/s ; k 为渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; k_0 为初始绝对渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; b 为滑脱因子, MPa ; α 为应力敏感系数, MPa^{-1} ; μ 为气体黏度, $mPa \cdot s$; P_0 为原始地层压力, MPa ; P 为地层压力, MPa ; λ 为启动压力梯度, MPa/m ; a 为变启动压力梯度乘系数,实验测得; m 为变启动压力梯度幂指数,实验测得; L 为裂缝半长, m ; P_{sc} 为标况下压力, MPa ; T_{sc} 为标况下的温度, K ; T 为气藏温度, K ; q_{sc} 为气井压裂后的地面产量, m^3/d ; h 为

气藏厚度, m ; Z 为压缩因子。

1.3 渗流方程的推导

将渗流速度式(2)带入到式(7)中,可以得到:

$$\frac{dP}{dr} - ak^{-m} = \frac{\mu}{k_0(1 + \frac{b}{P})\exp[-\alpha(P_e - P)]} \frac{P_{sc} Z T}{2\pi h P T_{sc} Z_{sc}} q_{sc} \quad (8)$$

定义拟压力函数为:

$$\varphi = 2 \int_{P_{wi}}^P \frac{Pk(P)}{\mu(P)Z(P)} dp \quad (9)$$

结合式(8)和式(9),在 w 平面上进行积分处理可以得到:

$$\varphi(P_0) - \varphi(P_{wi}) = \frac{P_{sc} T q_{sc} \zeta}{\pi h T_{sc}} + \int_0^\zeta \frac{2aPk^{1-m}}{\mu Z} d\zeta \quad (10)$$

式中: $\varphi(P_0)$ 为边界压力对应的拟压力值; $\varphi(P_{wi})$ 为井底流压对应的拟压力值。

1.4 渗流方程的近似解

根据保角交换的原理可知, $\zeta = \ln \frac{2r_c}{L}$ 。储层渗透率变化引起的变启动压力梯度导致的压力降 $\int_0^\zeta \frac{2aPk^{1-m}}{\mu Z} d\zeta$ 并非为常数,而是与地层压力分布有关。由于无法获得压力与半径的关系,在对变启动压力梯度引起的附加压降进行积分时,采用常规的积分方法无法求解,必须采用定积分的近似算法,以获得近似解^[25]。即有:

$$\int_0^\zeta \frac{2aPk^{1-m}}{\mu Z} d\zeta = \frac{a(P_0 + P_{wi})}{\bar{\mu Z}} [k_0 e^{-\alpha(P_0 - P)} \times (1 + \frac{b}{P})]^{(1-m)} \ln \frac{2r_c}{L} \quad (11)$$

将(11)式带入(10)式中可得到气井产能方程如(12)式:

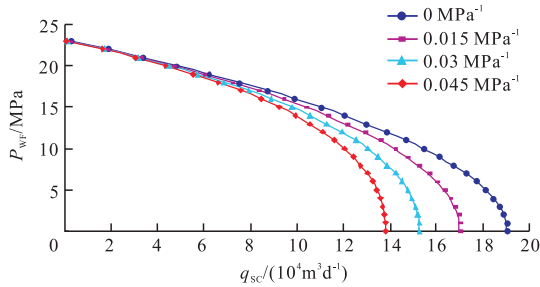


图2 应力敏感系数对气井产能的影响

Fig. 2 Influence of stress sensitivity on gas well productivity

$$\varphi(P_0) - \varphi(P_{wi}) = \frac{P_{sc} T q_{sc} \zeta}{\pi h T_{sc}} + \frac{a(P_0 + P_{wi})}{\bar{\mu Z}} [k_0 e^{-\alpha(P_0 - P)} (1 + \frac{b}{P})]^{(1-m)} \ln \frac{2r_c}{L} \quad (12)$$

根据保角变换原理可知,转换前后气井产量不发生变化,因此(12)式计算得到的 w 平面内气井产量即为 z 平面内气井产量。

2 因素敏感性分析

某低渗透气藏的地层参数如下^[15]:厚度为 30 m,气藏温度为 373 K,原始渗透率为 $0.0126 \times 10^{-3} \mu m^2$,供给半径为 300 m,裂缝半长 100 m,气体平均黏度为 0.017 mPa·s,气体平均压缩因子为 0.828 6,地层压力为 23 MPa,变启动压力梯度系数 a 和 m 分别为 0.016 和 0.437 4,滑脱因子为 1 MPa,应力敏感系数为 0.015 MPa⁻¹。

根据产能预测方程(12)式可以得到不同的因素对气井流入动态曲线的影响。

2.1 应力敏感系数的影响

图2描述的是应力敏感系数对气井产能的影响。由图2可知,无应力敏感下的气井产能最大,且应力敏感系数对低井底流压下的产能影响较大。由于应力敏感的存在,使得储层渗透率变小,气体渗流克服的阻力变大。相同井底流压条件下随着应力敏感系数的增大,气井产量降低,且无阻流量降低幅度最大。说明对于低渗透气藏,在低井底流压下,应力敏感效应对其产能有较大影响。

2.2 滑脱因子的影响

图3描述的是滑脱因子对气井产能的影响。随

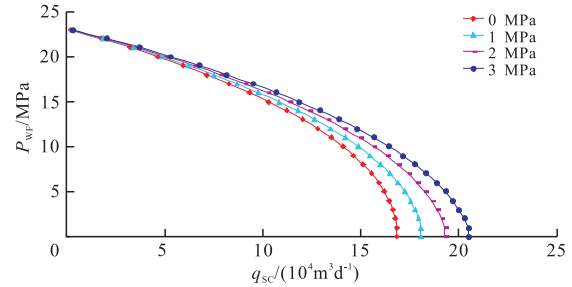


图3 滑脱因子对气井产能的影响

Fig. 3 Influence of slippage effect on gas well productivity

着滑脱因子的增大,气井产能增大,这主要是因为滑脱效应使储层的渗透率增大,导致气体更容易在储层中运移,从而提高了气井产能。而低井底流压下的气井产能大于高井底流压下,这一方面是因为井底流压的降低使得生产压差增大,另一方面生产压差的增大使得地层平均压力下降,储层渗透率增大大幅度升高,从而气井产能增大。因此在研究低渗透气藏气井产能时,需要考虑滑脱效应对产能的影响。

2.3 变启动压力梯度影响

2.3.1 乘系数(即 a)的影响

图4反映了变启动压力梯度乘系数(即 a)对气井产能的影响,即随着乘系数的增大,启动压力梯度增大,用于克服启动压力梯度的附加压降增大,导致气井产量降低。且根据式(12)可知,气井产量与乘系数呈负线性关系。因此,在预测气井产能时,需要准确测定乘系数。

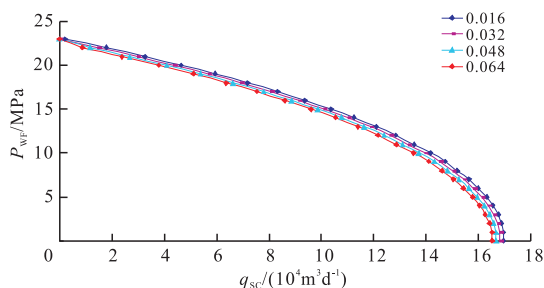


图4 乘系数(即 a)对气井产能的影响

Fig. 4 Influence of multiplying factor(a) on gas well productivity

2.3.2 幂指数(即 m)的影响

图5反映了幂指数对气井产能的影响,随着幂指数的增大,启动压力梯度增大,致使气体运移阻力增

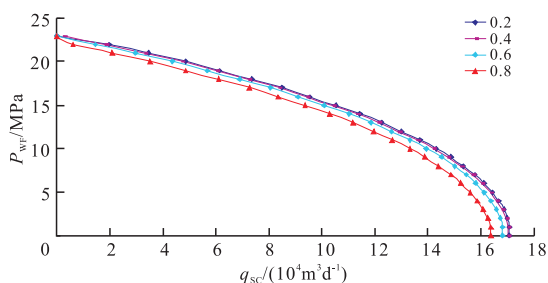


图5 幂指数(即 m)对气井产能的影响

Fig. 5 Influence of power factor(m) on gas well productivity

大,气井产量下降。当该指数变化范围较小时,其对产能的影响较小,而当该指数较大时,其产能明显下降。

2.3.3 变启动压力梯度影响

对于乘系数和幂指数,其主要是通过实验方法测量得到。而上述研究表明,乘系数与产能呈线性关系,幂指数超过一定范围后对产能影响很大。因此,在通过实验测量这些参数时,需要进行多次测量,以消除实验误差给产能预测带来的不利影响。

3 结论

建立了低渗气藏压裂井产能公式,综合考虑应力敏感效应、滑脱效应及变启动压力梯度对压裂气井产能的影响,并利用保角变换推导出压裂井(直井)的产能预测模型,对参数敏感性进行了分析,得到以下结论:

- 1) 储层的应力敏感性对低井底流压条件下的产能预测影响更大。因此,低渗透气藏在产能预测时需考虑介质变形的影响。
- 2) 由于滑脱效应的存在使得储层渗透率增大,从而气井产能增大。因此,对低渗储层需考虑滑脱效应的影响。
- 3) 由于启动压力梯度与储层渗透率有关且梯度系数对产能影响较大,因此,在预测产能前需要精准测量测定系数值,以得到较为准确的产能预测结果。

参考文献

- [1] 刘建军,刘先贵.低渗透岩石非线性渗流规律研究[J].岩石力学与工程,2003,22(4):556-561.
- [2] 吴凡,孙黎娟,乔国安,等.气体渗流特征及启动压力规律的研究[J].天然气工业,2001,21(1):82-84.
- [3] 朱光亚,刘先贵,李树铁,等.低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J].天然气工业,2007,27(5):44-47.
- [4] 熊健,郭平,李凌峰.滑脱效应和启动压力梯度对低渗透气藏水平井产能的影响[J].大庆石油学院学报,2011,35(2):78-81.
- [5] 何军,胡永乐,何东博,等.低渗致密气藏产能预测方法[J].断块油气田,2013,20(3):334-336,358.
- [6] 张楠,严仁田,韩倩,等.非达西渗流效应对考虑原油压缩系数低渗透油藏直井产能的影响[J].复杂油气藏,2011,4(4):41-44.
- [7] 郝斐,程林松,李春兰,等.特低渗透油藏启动压力梯度研究[J].西南石油学院学报,2006,28(6):29-32.

(下转第43页)