

低渗透气藏压裂井气水两相产能计算方法

刘志强,杨婧

中国石油大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司 黑龙江大庆 163000

通讯作者:Email:723716518@qq.com

项目支持:国家科技重大专项项目“特低渗复杂油气藏有效规模有效动用关键技术”(2017NX05013006)

引用:刘志强,杨婧. 低渗透气藏压裂井气水两相产能计算方法[J]. 油气井测试,2019,28(3):67-73.

Cite: LIU Zhiqiang, YANG Jing. Calculating method of gas-water two-phase productivity in fractured wells of low permeability gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019,28(3):67-73.

摘要 存在边、底水的低渗透气藏易形成气水两相流动,无法准确预测产水气井产能。基于低渗气藏典型渗流特征,考虑气井产水影响,结合压裂气井单相渗流特征,建立了计算低渗气藏压裂井气水两相产能计算公式,结合气水两相相渗曲线,得到求解气水两相广义拟压力以及压裂直井储层-裂缝气水两相渗流耦合模型。苏东南区A气井实例计算表明,根据线性回归方程求得无阻流量 $3.3709\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,利用本文模型计算气井无阻流量 $3.2919\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,与产能测试结果对比,绝对误差和相对误差仅为 $0.079\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 和2.34%,验证了新公式的准确性及适用性。同时,分析了启动压力梯度、应力敏感指数、水气体积比、裂缝半长,以及裂缝导流能力对压裂气井流入动态的影响,为低渗气藏气水两相压裂气井产能研究提供新思路。

关键词 低渗透气藏;气水两相;压裂直井;产能;启动压力梯度;计算方法

中图分类号:TE353 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.03.012

Calculating method of gas-water two-phase productivity in fractured wells of low permeability gas reservoirs

LIU Zhiqiang, YANG Jing

Well Testing Technology Service Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163453, China

Abstract: Low permeability gas reservoirs with edge and bottom water are easy to form gas-water two-phase flow and cannot accurately predict the productivity of water-producing gas wells. Based on the typical percolation characteristics of low permeability gas reservoirs, considering the influence of water production of gas wells and the single-phase percolation characteristics of fractured gas wells, a formula for calculating gas-water two-phase productivity of fractured gas wells in low permeability gas reservoirs was established. Then combining with the gas-water two-phase permeability curve, the generalized pseudo-pressure of gas-water two-phase and the gas-water two-phase percolation coupling model of straight wells fractured were obtained. The calculation result of a gas well in southeastern of Jiangsu shows that the absolute open flow rate calculated by the linear regression equation was $3.3709\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ and the absolute open flow rate calculated by the new model was $3.2919\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$. Compared with the productivity test results, the absolute and relative errors of result calculated by the new model were only $0.079\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ and 2.34%, which verified the accuracy and applicability of the new model. In addition, the effects of starting pressure gradient, stress sensitivity index, water-gas volume ratio, half-length of fracture and fracture conductivity on the inflow performance of fractured gas wells were also analyzed in this paper, which provided a new idea for the productivity study of gas-water two-phase fractured gas wells in low permeability gas reservoirs.

Keywords: low permeability gas reservoir; gas-water two-phase; fractured vertical well; productivity; starting pressure gradient; calculation method

低渗气藏在国内外天然气开发领域占有举足轻重的地位,近些年,水力压裂储层改造技术的发展使得低渗气藏得以效益开发,对缓解全球严峻的能源形势起到了较好的促进作用^[1]。矿场实践发现,对于距离边底水气藏较近的井,压裂改造实施

以后,可能导致沟通边底水。此外有些气藏主体分布在水气过渡带上,如四川盆地合川须家河气藏,气井改造后生产早期即表现为气水同产,此类压裂气井井筒周围表现出明显的气水两相渗流,如何评价其产能是矿场亟需解决的问题。

不少学者围绕低渗、压裂、产水等因素开展了大量渗流机理和产能计算方法研究工作。常宝华等^[2]针对低渗气藏中压裂水平井开展了渗流特征分析及渗流阶段划分。张小龙等^[3]分析了低渗气藏中启动压力梯度对气井渗流规律的影响。梅海燕等^[4]人通过将压裂水平井的渗流区域划分,利用等值渗流阻力手段建立压裂水平井产能计算方法。戴强等^[5]针对低渗气藏的渗流特征进行了归纳与总结,指出影响低渗气藏渗流特征的主要因素有应力作用、启动压力梯度、滑脱效应和水锁效应等因素。张烈辉等^[6]考虑了气体在低渗低压气藏中的滑脱效应,建立了形式简洁的气井产能方程。王德龙等^[7]以高速非达西渗流理论为依据,推导出考虑应力敏感、启动压力梯度以及滑脱效应的气井产能方程。汪永利等^[8]导出了压裂井裂缝内变质量流动时压力方程,进而推导出不同缝长和导流能力裂缝井的产能公式。此外,李冬瑶^[9]、熊健^[10]、罗天雨等^[11]也针对低渗和压裂气井产能问题,多角度多手段开展科技攻关,形成一系列成果。随着气藏开发的深入,气井流动由单相流动变为两相或多相流动,气井渗流规律的变化势必引起产能方程的重新计算。吕栋梁等^[12]将气井产水后引起的渗流阻力考虑为视表皮,从而修正产水气井产能方程。程时清等^[13]考虑凝析气藏反凝析和产水的三相流特,建立了三相流产能方程,详细描述了根据产能试井数据建立产能方程的步骤。朱光亚等^[14]针对低渗气水同产井,建立气水两相流动的半解析解。文华等^[15]基于气水同产两相渗流规律,考虑储层敏感性效应的影响,建立了新广义拟压力函数,确定产气水同产井的流入动态方程。孙恩慧等^[16]推导出考虑启动压力梯度和地层损害影响的低渗透气藏气水两相流井的三项式产能方程。

针对低渗气井改造后的两相渗流问题,现基于低渗气藏、裂缝两相渗流机理,在总结前人研究的基础上,推导了低渗气藏压裂井气水两相渗流的产能计算方程,分析了启动压力梯度、应力敏感指数等因素对压裂气井流入动态的影响。通过实例应用验证了新公式的准确性及适用性,为此类气井产能评价提供了新的思路。

1 低渗透气藏气水两相压裂井产能方程推导

假设一直井位于储层厚度为 h 的低渗气藏中,该井纵向压裂后投产,裂缝完全贯穿储层,且裂缝

等宽度,均为 w_f ,裂缝沿井筒呈对称分布,且为有限导流裂缝,气井的单井控制半径为 r_e ,井筒半径为 r_w ,裂缝半长为 x_f 。目前,地层压力为 p_e 、井底流压为 p_{wf} ,不考虑气水互溶,忽略重力及毛管力的影响,压裂井物理模型如图 1 所示。

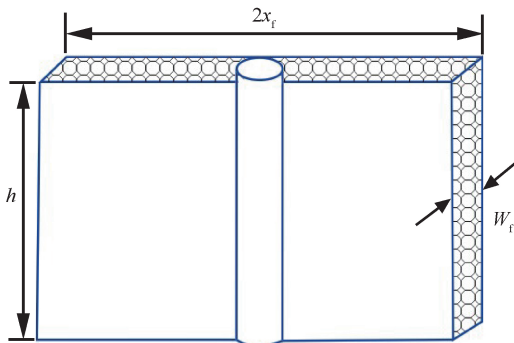


图 1 压裂井渗流物理模型

Fig.1 Percolation physical model of fractured wells

直井经水力压裂后,储层中的渗流由单一的地层渗流变为将地层+裂缝中的渗流。因此,通常将其划分为两个渗流场分别研究。地层中的渗流表现出平面径向渗流特征(Ⅱ区),裂缝中的渗流表现为线性渗流特征(Ⅰ区)。

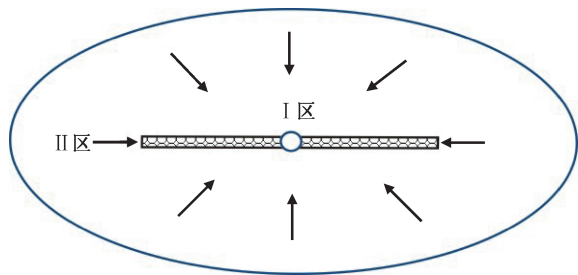


图 2 压裂井水平渗流场划分

Fig.2 Division of horizontal seepage field in fractured wells

1.1 产能模型推导

针对压裂直井渗流场特征,考虑其由两个渗流场组成,分别建立裂缝内的渗流模型以及地层内渗流模型,两者耦合得到整个压裂直井气、水两相产能模型。

1.1.1 裂缝内渗流模型推导

裂缝内,由于考虑井筒,气、水两相渗流速度较快,特别是气相高速非达西渗流特征较为明显,水相仍表现为达西渗流特征。因此,裂缝中气相运动方程分别为

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = 11.574 \frac{\mu_g}{K_f K_{rg}} v_g + 1.339 \times 10^{-13} \beta_0 \rho_g v_g^2 \\ v_g = 5 \times 10^3 \frac{\rho_{gsc} q_{gsc}}{\rho_g \omega_f h} \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ_g 为地层条件下气相黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; K_f 为裂缝绝对渗透率, mD ; K_{rg} 为裂缝中气水两相渗流条件下气相相对渗透率; v_g 为气相渗流速度, m/d ; ρ_g 为气相地层条件下密度, g/cm^3 ; ρ_{gsc} 为气相地面标准状况下密度, g/cm^3 ; β_f 为紊流系数, m^{-1} ; ω_f 为裂缝宽度, m ; h 为储层有效厚度, m ; q_{gsc} 为标准状况下的气相体积流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

裂缝中水相运动方程为

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = 11.574 \frac{\mu_w}{K_f K_{rw}} v_w \\ v_w = 5 \times 10^3 \frac{\rho_w q_w}{\rho_w \omega_f h} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{rw} 为裂缝中气水两相渗流条件下水相相对渗透率; μ_w 为水相黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; v_w 为水相渗流速度, m/d ; ρ_w 为地层条件下水相密度, g/cm^3 ; q_w 为地层条件下水相体积流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

结合(1)式、(2)式可以得到

$$\left(\rho_w \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \rho_g \frac{K_{rg}}{\mu_g} \right) dp = \left(5.787 \times 10^4 \frac{\rho_w q_w + \rho_{gsc} q_{gsc}}{K_f \omega_f h} + 3.35 \times 10^{-6} \beta_f \frac{K_{rg}}{\mu_g} \frac{\rho_g^2 q_g^2}{\omega_f^2 h^2} \right) dx \quad (3)$$

定义裂缝内气水两相渗流条件下两相拟压力为

$$\varphi(p) = \int_{p_0}^p \left(\rho_w \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \rho_g \frac{K_{rg}}{\mu_g} \right) dp \quad (4)$$

定义水气体积比为 $WGR = q_{gsc}/q_w$

可以得到气水两相总质量为

$$\rho_w q_w + \rho_{gsc} q_{gsc} = \left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_{gsc}} WGR \right) \rho_{gsc} q_{gsc} \quad (5)$$

将(4)式、(5)式代入(3)式中,两边同时在定义域积分得到

$$\begin{aligned} \varphi(p_f) - \varphi(p_{wf}) &= 5.787 \times 10^4 \times \\ &\frac{\left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_{gsc}} WGR \right) \rho_{gsc} (x_f - r_w)}{K_f \omega_f h} q_{gsc} + \\ &3.35 \times 10^{-6} \beta_f \frac{K_{rg}}{\mu_g} \frac{\rho_{gsc}^2 (x_f - r_w)^2}{\omega_f^2 h^2} q_{gsc}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: p_f 为裂缝尖端压力, MPa ; p_{wf} 为井底流压, MPa ; x_f 为裂缝半长, m ; r_w 为井筒半径, m 。

1.1.2 地层内渗流模型推导

压裂直井周围外部的渗流场为一簇簇椭圆形曲线(图3),地层向裂缝中的渗流为椭圆形渗流,可以利用椭圆形渗流规律来描述其渗流特征^[17]。

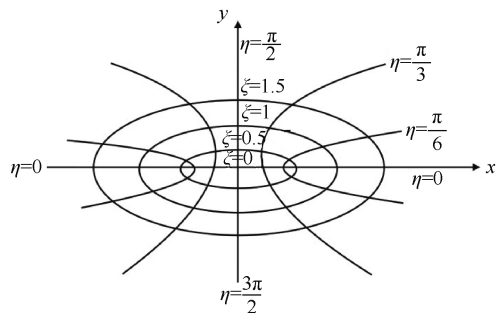


图3 地层内椭圆渗流场示意图

Fig.3 Schematic diagram of elliptical seepage field in formation

椭圆形坐标与直角坐标的关系为

$$\begin{cases} x = a \cos \eta \\ y = b \sin \eta \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$a = x_f \cosh \xi, \quad b = x_f \sinh \xi, \quad \xi = \sinh^{-1} \left(\frac{2\pi r}{x_f} \right)$$

式中: a 为椭圆形渗流场长半轴长, m ; b 为椭圆形渗流场短半轴长, m 。

椭圆形渗流的渗流场通常用发展的矩形族来描述,因此平均短半轴为

$$\bar{y} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} y d\eta = \frac{2b}{\pi} = \frac{2x_f \sinh \xi}{\pi} \quad (8)$$

则在椭圆坐标系内的压力梯度为

$$\frac{dp}{dy} = \frac{dp}{d\xi} \frac{d\xi}{dy} = \frac{\pi}{2x_f \cosh \xi} \frac{dp}{d\xi} \quad (9)$$

在地层气、水两相渗流条件下,同时考虑启动压力梯度及应力敏感效应的气相运动方程为

$$\begin{cases} \frac{dp}{dy} - \lambda_g = 11.574 \frac{\mu_g}{KK_{rg}} v_g \\ v_g = 2500 \frac{\rho_{gsc} q_{gsc}}{\rho_g x_f h \cosh \xi} \\ K = K_i e^{-\alpha(p_i - p)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ_g 为气相启动压力梯度, MPa/m ; K 为储层绝对渗透率, mD ; p_i 为储层原始地层压力, MPa ; K_i 为储层原始渗透率, mD ; v_g 为气水两相渗流条件下气相在地层内的渗流速度, m/d ; α 为储层应力敏感系数, MPa^{-1} 。

地层中水相运动方程为

$$\begin{cases} \frac{dp}{dy} - \lambda_w = 11.574 \frac{\mu_w}{KK_{rw}} v_w \\ v_w = 2500 \frac{\rho_w q_w}{\rho_w x_f h \cosh \xi} \end{cases} \quad (11)$$

式中： λ_w 为水相启动压力梯度，MPa/m； v_w 为地层内的水相渗流速度，m/d。

联立(9)式、(10)式、(11)式得到

$$\left(\rho_w \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \rho_g \frac{K_{rg}}{\mu_g}\right) e^{-\alpha(p_i-p)} dp =$$
$$\left[1.843 \times 10^4 \frac{\rho_w q_w + \rho_{gsc} q_{gsc}}{K_i h} + 0.637 x_f \left(\rho_w \frac{K_{rw}}{\mu_w} \lambda_w + \rho_g \frac{K_{rg}}{\mu_g} \lambda_g \right) e^{-\alpha(p_i-p)} \cosh \xi \right] d\xi$$
(12)

定义地层中气水两相拟压力函数为

$$H(p) = \int_{p_0}^p \left(\rho_w \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \rho_g \frac{K_{rg}}{\mu_g} \right) e^{-\alpha(p_i-p)} dp$$
 (13)

将地层中气水两相拟压力函数代入(12)式中，两边同时在定义域内积分得到

$$H(p_e) - H(p_f) = 1.843 \times 10^4 \times \frac{\left(1 + \frac{\rho_w WGR}{\rho_{gsc}} \right) \rho_{gsc} (\xi_e - \xi_f)}{2\pi K_i h} q_{gsc} + 0.637 \int_{\xi_f}^{\xi_e} x_f \left(\rho_w \frac{K_{rw}}{\mu_w} \lambda_w + \rho_g \frac{K_{rg}}{\mu_g} \lambda_g \right) e^{-\alpha(p_i-p)} \cosh \xi d\xi$$
 (14)

式中： p_e 为目前地层压力，MPa； ξ_e 为椭圆坐标中的单井控制半径； ξ_f 为椭圆坐标系中裂缝尖端长度。

联立(6)式、(14)式得到含有两个未知数(p_f)的方程组，即为低渗气藏压裂直井气水两相产能计算模型，利用牛顿迭代法计算得到气井产量。

1.2 气水两相拟压力函数的求解

气水两相渗流过程中，气相相对渗透率 K_{rg} 与水相相对渗透率 K_{rw} 存在以下关系：

$$\frac{K_{rg}}{K_{rw}} = \frac{1}{WGR} \frac{\mu_g B_g}{\mu_w B_w}$$
 (15)

式中： B_g 为地层条件下气体体积系数，m³/m³； B_w 为地层条件下水相体积系数，m³/m³。

地层条件下，气体黏度 μ_g 与密度 ρ_g 的关系式可采用 Lee 公式进行计算^[22]。因此，气、水两相拟压力的计算步骤如下：

(1) 利用气水两相相对渗透率曲线，拟合得到 K_{rg} 、 K_{rw} 与 S_w 的关系式，并将物性参数与其结合，利用迭代法得到任一压力 p 条件下的含水饱和度 S_w 。

(2) 将压力与含水饱和度的关系代入其与气、水两相相对渗透率 K_{rg} 、 K_{rw} 的关系式，得到气、水两相相对渗透率与压力 p 的关系。

(3) 根据气水两相拟压力的定义，将 K_{rg} 、 K_{rw} 、 ρ_g ，以及 μ_g 与压力的关系代入其中，利用复化梯形公式计算得到气水两相广义拟压力。

2 实例计算

苏东南区盒8层段内一口气水同产压裂直井A气井基本储层参数：原始地层压力为27.41 MPa，目前地层压力为27.28 MPa，气相启动压力梯度为0.000 5 MPa/m，水相启动压力梯度为0.001 5 MPa/m，气藏有效厚度为12.3 m，储层应力敏感指数为0.02 MPa⁻¹，地层温度为352.87 K，储层有效渗透率为0.5 mD，单井控制半径为714 m，井筒有效半径为0.098 2 m，裂缝宽度为0.008 m，裂缝有效半长为106.2 m，裂缝绝对渗透率为50 D，气、水两相渗流条件下气体平均偏差因子为0.910 3，地层水密度为1.0 g/m³，气体相对密度为0.676 7，地层水黏度为0.8 mPa·s，目前水气体积流量比为1 m³/10⁴ m³。气井X的产能系统试井基本数据见表1。

表1 气井X产能试井基本数据
Table 1 Basic data of productivity test for gas well X

测点	$q_{gsc}/$ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	$p_{wf}/$ MPa	$H(p_e)/$ ((g·MPa)·(cm ³ ·mPa·s) ⁻¹)	$H(p_{wf})/$ ((g·MPa)·(cm ³ ·mPa·s) ⁻¹)	$H(p_e)-H(p_{wf})$ ((g·MPa)·(cm ³ ·mPa·s) ⁻¹)
1	0.296 2	25.31	20.966 6	18.470 2	2.496 4
2	0.438 7	24.19		17.106 1	3.860 5
3	0.624 6	23.45		16.227 3	0.624 6
4	0.782 1	22.82		15.493 7	0.782 1

利用本文建立的低渗透气藏气水压裂井产能方程，结合表1中气井产能测试数据，通过回归得到产能曲线(图4)，其产能方程为

$$H(p_e) - H(p_{wf}) = 5.927 2 q_{gsc} + 0.968 8$$
 (16)

(16)式的相关系数为0.967 7，其中的0.968 8即为气水两相启动压力梯度对气井X产能的影响。根据线性回归方程，求得该井无阻流量为3.370 9×10⁴ m³/d；而利用本文模型计算气井无阻流量结果

为 $3.2919 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与产能测试结果对比,绝对误差与相对误差分别为 $0.079 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 与 2.34% ,两者均较小,验证了本文模型在计算低渗压裂产水气井产能计算中的准确性。

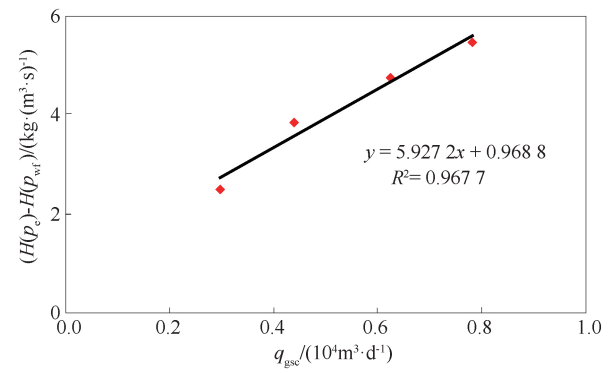


图 4 气井 X 产能试井分析曲线
Fig.4 Productivity test analysis curve of gas well X

同时,为了进一步验证本文模型的准确性,利用数值模拟方法,建立压裂直井的机理模型(图 5),结合实例参数,计算得到数值模拟方法下的无阻流量为 $3.4932 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与本文模型以及产能测试结果均误差较小。

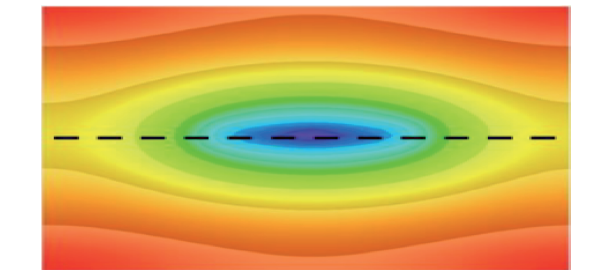


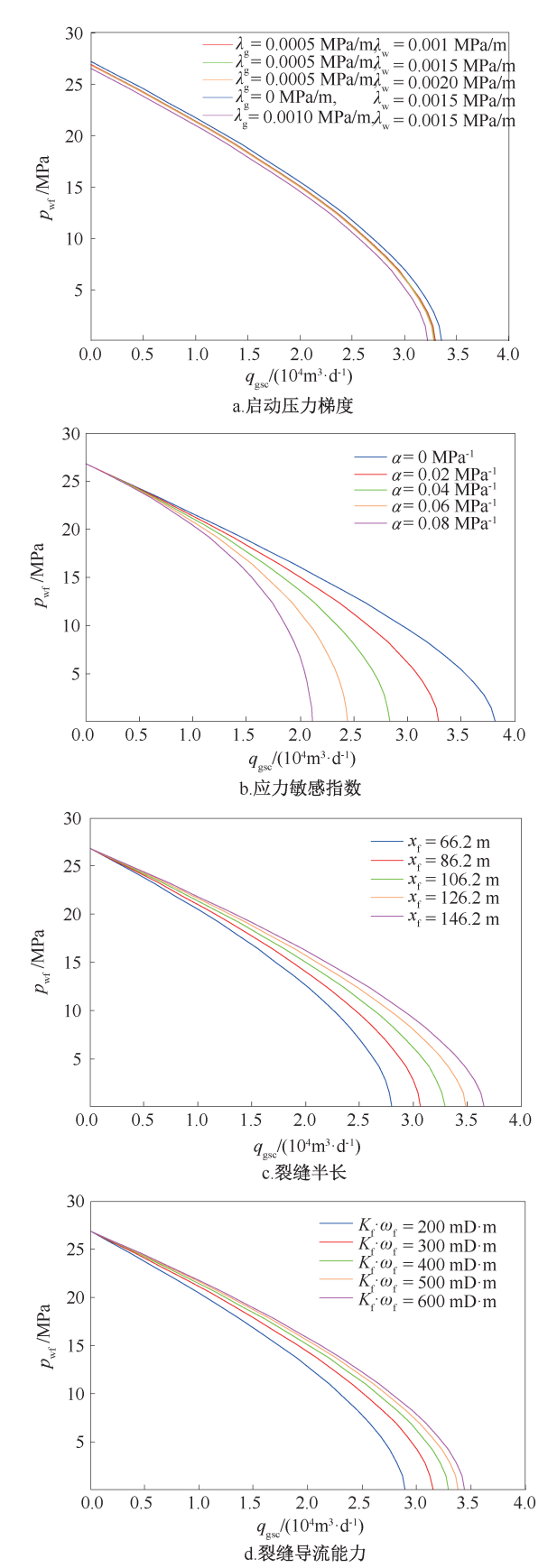
图 5 压裂直井机理模型
Fig.5 Mechanism model of fractured vertical well

3 敏感性分析

根据实例计算中的基本数据,利用本文新模型,分析各参数对气井 A 流入动态的影响(图 6)。

3.1 启动压力梯度

当其他参数一定时,作不同启动压力梯度条件下压裂气井流入动态曲线(图 6a)。由图 6a 可以看出,气相启动压力梯度对气井流入动态曲线影响更为显著。从总体趋势上看,当其他参数一定时,随两相启动压力梯度增加,流入动态曲线向左偏移,即气井的无阻流量降低。这是因为两相启动梯度越大,气体渗流阻力越大,无阻流量也将随之降低。因此,在预测低渗气藏气井产能时,不应忽视两相启动压力梯度,尤其是气相启动压力梯度的影响。



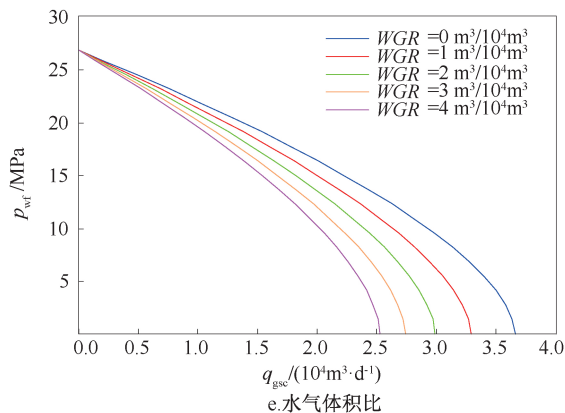


图6 敏感性参数对气水两相压裂井流入动态的影响

Fig.6 Effect of sensitivity parameters on inflow performance of gas-water two-phase fracturing wells

3.2 应力敏感指数

当其他参数一定时,作不同应力敏感指数条件下压裂气井流入动态曲线(图6b)。由图6b可以看出,随应力敏感指数增加,流入动态曲线向左偏移,即气井的无阻流量降低。这是因为应力敏感指数越大,应力敏感效应越严重,井底流压一定时,储层渗透率下降幅度将越大,无阻流量也将随之降低。因此,在预测低渗气藏气井产能时应考虑到应力敏感效应对产能的影响,以提高产能预测的准确性。

3.3 裂缝半长

当其他参数一定时,作不同裂缝半长条件下压裂气井流入动态曲线(图6c)。由图6c看出,随裂缝半长增加,流入动态曲线向右偏移,即气井的无阻流量增大,但增加的趋势越来越平缓。这是因为随着裂缝半长的增加,井筒与储层的接触面积将逐渐增大,且裂缝与储层平均渗透率也增加,无阻流量将随之增大。但随着裂缝半长的增加,裂缝中的渗流表现更为明显,通过裂缝中的线性渗流以及紊流效应消耗的压降越来越多。无阻流量的增加幅度将逐渐减小,因此在压裂施工过程中,应合理优化裂缝半长,同时考虑压裂施工费用的影响,达到压裂效果最优化。

3.4 裂缝导流能力

当其他参数一定时,不同裂缝导流能力下气、水两相压裂井流入动态曲线(图6d)。由该图可以看出,其他参数一定时,随裂缝导流能力增加,流入动态曲线向右偏移,即气井的无阻流量增大,但增加的幅度逐渐减小。这是因为增加裂缝导流能力既增加了裂缝与储层的接触面积,又降低了裂缝内的渗流阻力,无阻流量将随之增加。但增加裂缝导流能力也将导致裂缝内的压降增大,无阻流量的增

加幅度将逐渐减小。因此,在压裂施工前应对裂缝渗透率及裂缝宽度进行合理设计,以期达到压裂效果最优化。

3.5 水气体积流量比

其他参数一定时,作不同水气体积比条件下压裂气井流入动态曲线(图6e)。由图6e看出,水气体积流量比对气井流入动态曲线影响显著。随水气体积流量比增加,流入动态曲线向左偏移,即气井的无阻流量降低。这是因为随着水气体积流量比的增加,水相参与流动后气相渗透率将随之降低,地层中的能量损失也随之增加,无阻流量将随之降低。因此,当出现气水同产时,水气体积流量比对产能的影响不可忽视,在实际生产中需采取有效措施控制气井见水,以保证气井稳定生产。

4 结论

(1)以低渗气井压裂直井渗流理论为基础,将压裂井渗流区域划分为裂缝渗流与地层渗流区,基于线性流以及椭圆形渗流基础,分别建立了气水两相渗流条件下渗流模型,得到低渗气井压裂直井气水两相产能计算模型。

(2)实例计算表明,利用本文模型计算的气井无阻流量与产能测试无阻流量绝对误差与相对误差均较小,验证了本文模型的准确性。

(3)敏感性分析表明,随启动压力梯度、应力敏感系数、水气体积流量比增加,气井产能逐渐降低。气相启动压力梯度比水相启动压力梯度的影响更为显著,应力敏感及水气体积流量比对产能的影响较大,因此在产能预测中不能忽视上述各因素的影响,需预防气井过早见水,优化裂缝半长。

致谢:感谢大庆油田测试分公司同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 陈挺,周勋,刘智格,等. 低残渣 CO₂ 泡沫压裂液在苏里格低压低渗气藏的应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(5): 92-94.
CHEN Ting, ZHOU Xun, LIU Zhike, et al. Application of low residue CO₂ foam fracturing fluid in low pressure low permeability gas reservoirs in Sulige [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(5): 92-94.
- [2] 常宝华,强小龙,杨亚涛,等. 低渗透气藏压裂水平井试井曲线特征及影响因素[J]. 油气井测试, 2018, 28(2): 1-6.
CHANG Baohua, QIANG Xiaolong, YANG Yatao, et al. Well testing curves of fractured horizontal wells in low-permeability gas reservoirs: characteristics and influencing factors [J]. Well Testing, 2018, 28(2): 1-6.

- [3] 张小龙,杨志兴. 启动压力梯度对低渗气藏不稳定渗流特征的影响[J]. 油气井测试,2018,27(3):7-13.
ZHANG Xiaolong, YANG Zhixing. Impacts of start-up pressure gradient on features of transient seepage flow in low-permeability gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(3):7-13.
- [4] 梅海燕,唐勇,贾生龙,等. 低渗气藏压裂水平井渗流与井筒压降耦合模型[J]. 断块油气田,2018,25(6):771-775.
MEI Haiyan, TANG Yong, JIA Shenglong, et al. Coupled model of seepage and wellbore pressure drop in fracturing horizontal wells for low permeability gas reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018,25(6):771-775.
- [5] 戴强,段永刚,陈伟,等. 低渗透气藏渗流研究现状[J]. 特种油气藏,2007,14(1):11-14.
DAI Qiang, DUAN Yonggang, CHEN Wei, et al. Present state of low permeability reservoir percolation study [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018,41(5):92-94.
- [6] 张烈辉,梁斌,刘启国,等. 考虑滑脱效应的低渗低压气藏的气井产能方程[J]. 天然气工业,2009,29(1):76-78.
ZHANG Liehui, LIANG Bin, LIU Qiguo, et al. A new deliverability equation considering slippage effect for gas reservoirs with low permeability and low pressure [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(1):76-78.
- [7] 王德龙,王宪文,闫娟,等. 非达西效应对低渗气藏气井产能影响研究[J]. 特种油气藏,2012,19(5):97-99.
WANG Delong, WANG Xianwen, YAN Juan, et al. Study on the influence of non-Darcy effects on the gas well productivity in low-permeability gas reservoirs [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012,19(5):97-99.
- [8] 汪永利,蒋廷学,曾斌. 气井压裂后稳态产能的计算[J]. 石油学报,2003,24(4):65-68.
WANG Yongli, JIANG Tingxue, ZENG Bin. Productivity performances of hydraulically fractured gas well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(4):65-68.
- [9] 李冬瑶,程时清,郑春峰. 考虑滑脱效应的低渗透气藏压裂井产能分析[J]. 特种油气藏,2009,16(2):59-61.
LI Dongyao, CHENG Shiqing, ZHENG Chunfeng. Productivity analysis for fractured well in low-permeability gas reservoirs considering slippage effect [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009,16(2):59-61.
- [10] 熊健,刘向君,陈朕. 低渗气藏压裂井动态产能预测模型研究[J]. 岩性油气藏,2013,25(2):82-85,91.
XIONG Jian, LIU Xiangjun, CHEN Zhen. Dynamic productivity prediction model for fracturing wells in low permeability gas reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(2):82-85,91.
- [11] 罗天雨,赵金洲,郭建春. 求取压裂后气井产能的椭圆流方法[J]. 天然气工业,2005,25(10):94-96.
LUO Tianyu, ZHAO Jinzhou, GUO Jianchun. Elliptical flow method to calculate productivity of gas wells after fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2005,25(10):94-96.
- [12] 吕栋梁,唐海,吕渐红,等. 气井产水时产能方程的确定[J]. 岩性油气藏,2010,22(4):112-115.
LYU Dongliang, TANG Hai, LYU Jianhong, et al. Deliverability equation for water-production gas well [J]. Lithologic Reservoirs, 2010,22(4):112-115.
- [13] 程时清,谢林峰,李相方,等. 产水凝析气井三相流产能方程[J]. 天然气工业,2004,24(12):99-101.
CHENG Shiqing, XIE Linfeng, LI Xiangfang, et al. Productivity equation of 3-phase flow for water-producing condensate wells [J]. Natural Gas Industry, 2004,24(12):99-101.
- [14] 朱光亚,刘先贵,高树生,等. 低渗透气藏气水两相渗流模型及其产能分析[J]. 天然气工业,2009,29(9):67-70.
ZHU Guangya, LIU Xiangui, GAO Shusheng, et al. A gas-water two-phase flow model for low permeability gas reservoirs and deliverability analysis thereof [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(9):67-70.
- [15] 文华,刘义坤,孙娜. 基于广义拟压力法的深层火山岩产水气井产能方程[J]. 大庆石油学院学报,2010,34(1):43-46.
WEN Hua, LIU Yikun, SUN Na. The productivity equation for water-producing gas well in deep volcanic gas reservoir based on generalized pseudo-pressure [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010,34(1):43-46.
- [16] 孙恩慧,李晓平,王伟东. 低渗透气藏气水两相流井产能分析方法研究[J]. 岩性油气藏,2012,24(6):121-124.
SUN Enhui, LI Xiaoping, WANG Weidong. Productivity analysis method of water and gas two-phase flow well in low permeability gas reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2012,24(6):121-124.
- [17] 邓英尔,刘慈群,王允诚. 垂直裂缝井两相非达西椭圆渗流特征线解、差分解及开发指标计算方法[J]. 石油勘探与开发,2000,27(1):60-63,75.
DENG Yinger, LIU Ciqun, WANG Yuncheng. Characteristic solution and finite difference solution of two-phase percolation in the direction of normal of ellipse and calculation of development indexes [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000,27(1):60-63,75.

编辑 穆立婷

第一作者简介:刘志强,男,1983年出生,工程师,2007年毕业于大庆石油学院石油工程专业,现主要从事油气井测试工艺与资料解释工作。电话:0459-4498284,13904593392; Email:723716518@qq.com。通信地址:黑龙江省大庆市大同区第七采油厂测试七大队,邮政编码:163000。