

# 低渗含水气藏非线性数值试井解释模型及压力特征分析

冯青

中海油田服务股份有限公司油田生产研究院 天津 300459

通讯作者:Email:fengqing2@cosl.com.cn

项目支持:中国海洋石油公司科研项目“海上油田生物纳米解堵增注技术研究及应用(一期)”(YSB18YF008)

引用:冯青. 低渗含水气藏非线性数值试井解释模型及压力特征分析[J]. 油气井测试, 2019, 28(2): 6-13.

Cite: FENG Qing. Nonlinear numerical well test interpretation model and pressure characteristics analysis for low permeability water-bearing gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019, 28(2): 6-13.

**摘要** 为研究流体非线性渗流对疏松低渗气藏试井压力动态特征的影响,建立启动压力梯度及应力敏感效应影响下的气水两相数值试井模型,采用有限差分及IMPES方法进行求解,绘制压力及其导数双对数图版,并进行影响参数的敏感性分析。研究表明,启动压力梯度、应力敏感效应均会增加流体的渗流阻力,导致不同边界类型试井解释中压力及压力导数曲线上翘,径向流水平段消失;气水比、表皮系数对压力导数径向流段影响较小,对压力曲线的开口大小影响较大;井筒储集系数较大时会掩盖掉部分径向流特征段,但不会影响后续的径向流及边界效应阶段。该方法对存在启动压力及应力敏感效应的低渗含水气藏压力恢复试井解释具有指导意义。

**关键词** 低渗气藏;数值试井;应力敏感;启动压力;敏感性分析;压力特征;径向流

中图分类号:TE353 文献标识码:A DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.02.002

## Nonlinear numerical well test interpretation model and pressure characteristics analysis for low permeability water-bearing gas reservoirs

FENG Qing

Oilfield Production Research Institute of China Oilfield Service Co., Ltd., Tianjin 300459, China

**Abstract:** A gas-water two-phase numerical well test model under the influence of starting pressure gradient and stress sensitivity effect was established to study the influence of nonlinear seepage flow on the pressure dynamic characteristics in well testing of loose and low permeability gas reservoirs. Then, the model was solved by finite difference and IMPES method. The pressure and pressure derivative curves were drawn and the sensitivity analysis of the influencing parameters was conducted. The research results show that the starting pressure gradient and stress-sensitive effect increase the seepage resistance of the fluid, which leads to the buildup of the pressure and pressure derivative curves in the well test interpretation of different boundary types, and the disappearance of horizontal section of the radial flow. The gas-water ratio and the skin factor has little effect on the pressure derivative radial flow section, but has a great influence on the opening of the pressure curve. When the wellbore storage coefficient is large, part of radial flow section will be masked, but the subsequent radial flow and boundary effect section are not affected. The proposed method can guide the pressure buildup test interpretation of low permeability water-bearing gas reservoirs with starting pressure and stress sensitivity effects.

**Keywords:** low permeability gas reservoir; numerical well test; stress sensitivity; starting pressure; sensitivity analysis; pressure characteristics; radial flow

疏松低渗气藏由于岩性致密、黏土矿物含量高、孔吼细小及压力传导能力差等特点,流体渗流易受到启动压力梯度和应力敏感的影响<sup>[1-3]</sup>。流体渗流启动压力梯度一般存在常规启动压力梯度和反渗汲水锁启动压力梯度。常规启动压力梯度是受到流体分子剪切应力作用的影响,渗流压差小于启动临界值时,流体渗流速率为0;而反渗汲水锁启

动压力梯度是指由于钻完井或压裂酸化施工时外来液体侵入储层,产生水锁效应,界面张力增大,导致气相渗透率下降。低渗气藏渗流除了受到启动压力梯度的影响,还会受到应力敏感伤害;尤其在开发生产中后期,储层流体产出引起孔隙压力下降,有效应力增加导致岩石发生结构变形或本体变形,介质微小孔道闭合,储层孔隙度和渗透率均会

发生下降,储层应力敏感效应和启动压力梯度均会加大<sup>[4-5]</sup>。过去研究中发现孔隙度受应力影响较弱,但渗透率和启动压力梯度随应力的动态变化对低渗油气藏流体渗流影响较大<sup>[6-8]</sup>。

目前,国内外一些学者对启动压力或应力敏感作为单一因素影响单井产能、底水锥进、室内实验评价等的研究较多。2011 年,汪全林等<sup>[9]</sup>选取青海某油田天然岩心进行分析化验,发现启动压力梯度与岩石孔隙度、孔隙半径成反比,与流体黏度、孔道迂曲度、岩石比面成正比,孔道半径、迂曲度对启动压力的影响超过孔隙度和流体黏度。2012 年,刘丽<sup>[10]</sup>研究认为低渗气藏中地层压力的下降会造成岩石变形影响储层物性和渗流能力,且储层启动压力梯度随着有效上覆压力增加而增加。2013 年,刘峰等<sup>[11]</sup>考虑渗透率降低和孔隙度随应力变化对油井产能的影响,提出了产能—应力敏感性指数的概念,随着产能应力敏感指数增加,油井无阻流量下降速度降低。2016 年,谷建伟等<sup>[12]</sup>利用实验确定应力敏感参数,引入虚拟裂缝概念,采用保角变换方法建立应力敏感和启动压力梯度影响下的水平井产能方程,分析了应力敏感效应、水平井长度等参数对油藏产能的影响。2017 年,汤连东等<sup>[13]</sup>基于低渗底水油藏的渗流特征和介质压力敏感性等特点,推导建立应力敏感效应影响下的底水油藏底水突破时间预测公式,发现应力敏感系数和油水黏度比越大,底水突破时间越早,对油井产能产生较大的伤害。2018 年,张小龙等<sup>[14]</sup>考虑启动压力梯度的非达西渗流特征,建立了不同外界边界条件下的低渗气藏不稳定渗流数学模型,通过实例绘制了不同启动压力梯度下井底压力与时间的双对数曲线,分析了启动压力的影响程度。欧阳伟平等<sup>[15]</sup>建立了一种综合考虑储层应力敏感、启动压力梯度以及滑脱效应的压裂水平井 3D 非线性渗流数学模型,利用混合有限元方法对模型进行求解,获得了非线性渗流条件下压裂水平井的试井理论曲线及产量递减 Blasingame 曲线。但目前针对启动压力和应力敏感对产水低渗气井井底流压动态的综合影响研究较少,如果采用不考虑应力敏感的渗流模型分析压力动态时会产生较大偏差,尤其对于疏松低渗含水气藏。

为了研究疏松低渗气藏开发过程中储层物性及井底流压的变化规律,在前人研究基础上,结合低渗储层非线性渗流特征,本文通过建立启动压

力及应力敏感效应影响下的气水两相数值试井模型,研究气水比、启动压力、应力敏感等因素对井底压力动态的影响程度,为受应力敏感影响的测试资料试井解释提供理论基础,指导该类气藏的合理开发。

## 1 数学模型的建立及求解

由于低渗储层存在低孔低渗、非均质性强及束缚水饱和度高等特点,气、水易在狭窄的孔隙吼道处形成水化膜,增加流体渗流的黏滞阻力;同时地层流体的累积产出导致孔隙压力降低,多孔介质易发生结构变形,引起储层物性变差,所以低渗储层流体渗流存在启动压力和应力敏感效应的双重影响。文中建立试井渗流数学模型时,假设条件如下:(1)储层为单一介质类型;(2)流体在储层中呈径向等温达西渗流;(3)考虑气水两相启动压力梯度的影响;(4)考虑多孔介质应力敏感效应的影响;(5)初始时刻储层压力为原始地层压力,气水两相存在毛管压力。

### 1.1 数学模型的建立

由含水气藏渗流规律<sup>[16-17]</sup>可知,启动压力梯度影响下的渗流速度为

$$\begin{cases} v = -\frac{K}{\mu} \nabla p \left(1 - \frac{\lambda}{\nabla p}\right) & (|\nabla p| \geq \lambda) \\ v = 0 & (|\nabla p| < \lambda) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v$  为流体渗流速度, m/s;  $K$  为储层渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\lambda$  为流体相启动压力梯度, MPa/m;  $\mu$  为流体黏度, mPa·s。

由(1)式,则考虑应力敏感效应下水相和气相的运动方程可写为:

$$v_x = -\frac{K_{rx}}{\mu_x} K(p) \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \lambda_x \right) \quad (2)$$

其中

$$K(p) = K_i e^{a(p-p_i)}$$

式中: $K(p)$  为应力敏感效应下渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $a$  为应力敏感系数;  $K_{rx}$  为流体相对渗透率, 小数;  $\lambda_x$  为流体相启动压力梯度, MPa/m;  $\mu_x$  为流体黏度, mPa·s; 下标  $x$  分为气相和水相, 分别由  $g$ 、 $w$  表示。

由质量守恒定律<sup>[18-20]</sup>, 气、水两相的渗流控制方程为

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_w v_{wr}) = \frac{\partial}{\partial t} (S_w \phi \rho_w) \quad (3)$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_g v_{gr}) = \frac{\partial}{\partial t} (S_g \phi \rho_g) \quad (4)$$

式中:  $S_w$  为含水饱和度, %;  $S_g$  为含气饱和度, %;  $\rho_g$  为气相密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_w$  为水相密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v_{wr}, v_{gr}$  分别为水相、气相流体渗流速度,  $\text{m/s}$ ;  $\phi$  为储层孔隙度, %。

由(2)式、(3)式和(4)式, 可得启动压力及应力敏感效应影响下水相渗流控制方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \left( r \rho_w \frac{K_{rw}}{\mu_w} K(p_w) \left( \frac{\partial p_w}{\partial r} - \lambda_w \right) \right)}{\partial r} = \frac{\partial (S_w \phi \rho_w)}{\partial t} \quad (5)$$

气相渗流控制方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \left( r \rho_g \frac{K_{rg}}{\mu_g} K(p_g) \left( \frac{\partial p_g}{\partial r} - \lambda_g \right) \right)}{\partial r} = \frac{\partial (S_g \phi \rho_g)}{\partial t} \quad (6)$$

辅助方程:

$$S_g + S_w = 1 \quad (7)$$

$$p_g - p_w = p_{cgw}(S_w) \quad (8)$$

内边界条件:

$$\lim_{r \rightarrow r_w} \frac{2\pi h K_{rg} K(p)}{\mu_g} r \left( \frac{\partial p_g}{\partial r} - \lambda_g \right) = q_g \quad (9)$$

$$\lim_{r \rightarrow r_w} \frac{2\pi h K_{rw} K(p)}{\mu_w} r \left( \frac{\partial p_w}{\partial r} - \lambda_w \right) = q_w \quad (10)$$

式中:  $p_g$  为气相压力, MPa;  $p_w$  为水相压力, MPa;  $p_{cgw}$  为毛管压力, MPa;  $q_g$  为气产量,  $10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ;  $q_w$  为水产量,  $10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ;  $h$  为气层厚度, m。

近井地带压力分布呈“压降漏斗”形状<sup>[21-23]</sup>, 呈对数形态分布, 对气藏进行空间网格划分时也应按对数非均匀划分, 则可得到径向距离的无因次表达式为

$$x = \ln \frac{r}{r_w} \quad (11)$$

从井口壁  $r_w$  到油藏边界  $r_e$ , 假设划分  $n$  个网格块, 则

$$n\Delta x = \ln \frac{r_e}{r_w}, x = i\Delta x \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

由无因次径向距离(11)式, 可得  $\frac{\partial x}{\partial r} = \frac{1}{r}$ , 则压力梯度和启动压力梯度变为

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{r} \quad (13)$$

$$\lambda_w = \lambda_{wx} \frac{\partial x}{\partial r} = \lambda_{wx} \frac{1}{r} \quad (14)$$

## 1.2 渗流模型有限差分

根据(12)式和(13)、(14)式, 对(5)式进行空

间差分, 对压力进行 IMPES 半隐式处理<sup>[24-26]</sup>, 得

$$A_{wwi+1/2} (p_{wi+1}^{(n+1)} - p_{wi}^{(n+1)}) - A_{wwi-1/2} (p_{wi}^{(n+1)} - p_{wi-1}^{(n+1)}) + \lambda_{wxi} = B_{wwi} (S_w^{(n+1)} - S_w^{(n)}) + C_{wwi} (p_{wi}^{(n+1)} - p_{wi}^{(n)}) \quad (15)$$

同理, 由气相渗流方程(6)得差分后的渗流方程为

$$A_{ggi+1/2} (p_{gi+1}^{(n+1)} - p_{gi}^{(n+1)}) - A_{ggi-1/2} (p_{gi}^{(n+1)} - p_{gi-1}^{(n+1)}) + \lambda_{gxi} = B_{ggi} (S_g^{(n+1)} - S_g^{(n)}) + C_{ggi} (p_{gi}^{(n+1)} - p_{gi}^{(n)}) \quad (16)$$

系数定义为:

$$A_{wwi+1/2} = \left( \frac{\rho_w^{(n)} \frac{K_{rw}}{\mu_w} K(p_w)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x^2} \right)_{i+1/2}$$

$$A_{wwi-1/2} = \left( \frac{\rho_w^{(n)} \frac{K_{rw}}{\mu_w} K(p_w)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x^2} \right)_{i-1/2}$$

$$B_{wwi} = \left( \frac{\phi \rho_w}{\Delta t} \right)_i$$

$$C_{wwi} = \left( \frac{\phi \rho_w C_w S_w}{\Delta t} \right)_i$$

$$\lambda_{wxi} = \left[ \left( \frac{\rho_w^{(n)} \frac{K_{rw}}{\mu_w} K(p_w)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x} \right)_{i-1/2} - \left( \frac{\rho_w^{(n)} \frac{K_{rw}}{\mu_w} K(p_w)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x} \right)_{i+1/2} \right] \lambda_{wx}$$

$$A_{ggi+1/2} = \left( \frac{\rho_g^{(n)} \frac{K_{rg}}{\mu_g} K(p_g)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x^2} \right)_{i+1/2}$$

$$A_{ggi-1/2} = \left( \frac{\rho_g^{(n)} \frac{K_{rg}}{\mu_g} K(p_g)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x^2} \right)_{i-1/2}$$

$$B_{ggi} = \left( \frac{\phi \rho_g}{\Delta t} \right)_i$$

$$C_{ggi} = \left( \frac{\phi \rho_g C_g S_g}{\Delta t} \right)_i$$

$$\lambda_{gxi} = \left[ \left( \frac{\rho_g^{(n)} \frac{K_{rg}}{\mu_g} K(p_g)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x} \right)_{i-1/2} - \left( \frac{\rho_g^{(n)} \frac{K_{rg}}{\mu_g} K(p_g)^{(n)}}{r_w^2 e^{2i\Delta x} \Delta x} \right)_{i+1/2} \right] \lambda_{gx}$$

$$\left[ \frac{\rho_g^{(n)} \frac{K_{rg}^{(n)}}{\mu_g^{(n)}} K(p_g)^{(n)}}{r_g^2 e^{2i\Delta x} \Delta x} \right]_{i+1/2} \lambda_{gx}$$

对内边界条件(9)式和(10)式进行时间空间有限差分,得

$$p_{g1} - p_{gwf} = D_0 \quad (17)$$

其中

$$D_0 = \frac{\left[ q_l + \frac{2\pi h K_{rg} K(p)}{\mu_g} \lambda_{gx} + \frac{2\pi h K_{rw} K(p)}{\mu_w} \lambda_{wx} \right] \Delta x}{\frac{2\pi h K_{rw} K(p)}{\mu_w} + \frac{2\pi h K_{rg} K(p)}{\mu_g}}$$

$$q_l = q_g + q_w$$

式中:  $p_{g1}$  为第一个网格块的压力, MPa。

定压外边界:

$$p(r_e, t) = p_e$$

则令气藏边界的网格块为

$$p_{gn}^{(n+1)} = p_e \quad (18)$$

封闭外边界:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=r_e} = 0$$

对(13)、(14)式化简,并进行中心差分可得

$$\left. \frac{\partial p_g}{\partial r} \right|_{r=r_e} = \left. \frac{\partial p_g}{\partial x} \right|_n = \frac{p_{gn+1}^{(n+1)} - p_{gn-1}^{(n+1)}}{2\Delta x} = 0 \quad (19)$$

$$p_{gn+1} = p_{gn-1} \quad (20)$$

又因为封闭边界为不渗透边界,要令网格块间传导率项为 0,即

$$A_{n+1/2} = 0 \quad (21)$$

## 2 压力动态典型特征分析

对数值试井模型(15)式和(16)式采用一步压力多步饱和度法进行求解<sup>[24-26]</sup>,从而得到每个时间步的井底压力响应,无因次定义如下:

$$p_D = \frac{K_i h}{1.842 \times 10^{-3} q_i \mu} (p_i - p_{wf})$$

$$t_D = \frac{3.6 K_i t}{\phi \mu_g C_i r_w^2}$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi \phi C_i h r_w^2}$$

式中:  $p_D, t_D, C_D$  分别为无因次压力、无因次时间、无因次井筒储集系数;  $K_i$  为相渗透率,  $\mu m^2$ ; 下标  $i$  表示水相、气相;  $\mu$  为流体黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $\phi$  储层孔隙度, %;  $t$  为生产时间, d;  $r_w$  为井筒半径, m;  $h$  为储层

厚度, m;  $p_i$  为原始地层压力, MPa;  $p_{wf}$  为井底流压, MPa;  $C$  为储层流体井筒储集系数,  $m^3/MPa$ ;  $C_i$  为气、水两相综合压缩系数,  $MPa^{-1}$ 。

由无因次压力、时间绘制出压降与压力导数典型双对数图版如图 1~7 所示。

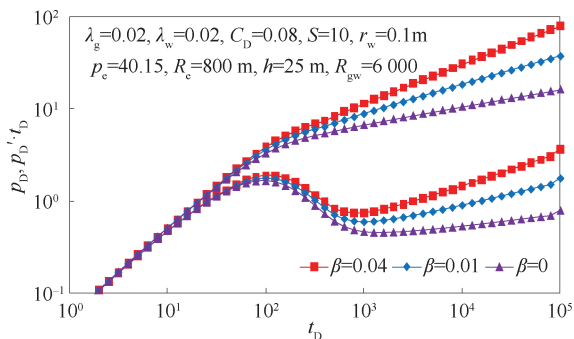


图 1 无限大边界时应力敏感效应影响下的双对数图  
Fig.1 Log-log plot under the stress-sensitive effects at infinite boundary

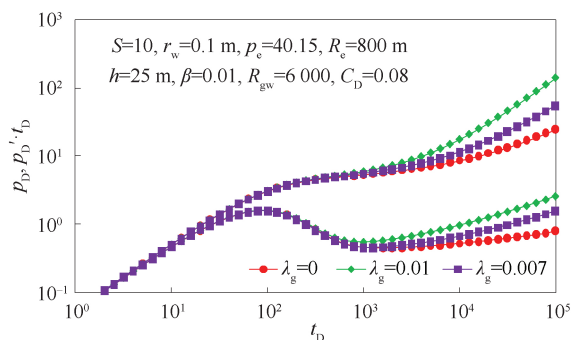


图 2 无限大边界时不同启动压力梯度下的双对数曲线  
Fig.2 Log-log curve under different starting pressure gradients at infinite boundary

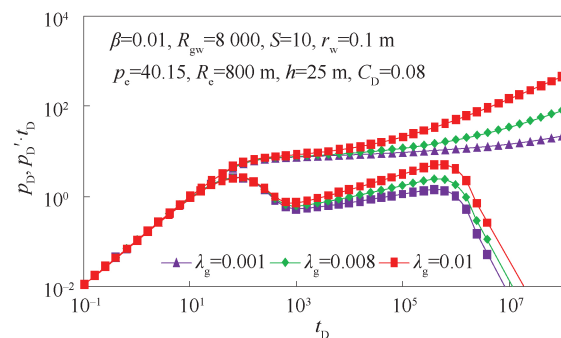


图 3 定压边界时启动压力梯度影响下的双对数曲线  
Fig.3 Log-log curve under the influence of starting pressure gradient at constant pressure boundary

由图 1~4 可看出,在水驱气藏无限大、定压及封闭边界中,由于受到启动压力、应力敏感效应的影响,均会导致地层流体渗流阻力加大,渗透率降低<sup>[27-28]</sup>,导致常规值为 0.5 的径向流水平段消失,压降及压力导数曲线均发生上翘,给常规试井解释带来了困难。



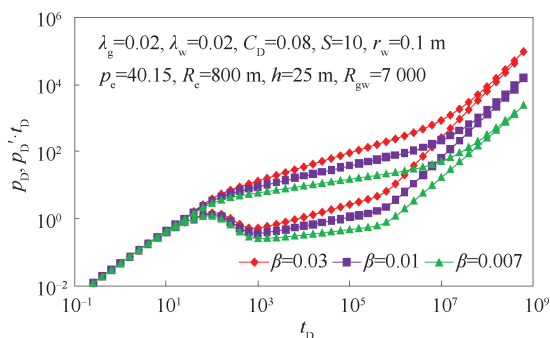


图4 封闭边界时应力敏感效应下的双对数曲线

Fig.4 Log-log curve under the stress-sensitive effects at closed boundary

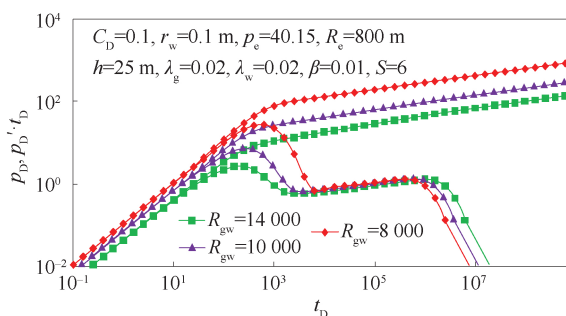


图5 定压边界时不同气水比下的双对数曲线

Fig.5 Log-log curve at different gas-water ratios at constant pressure boundary

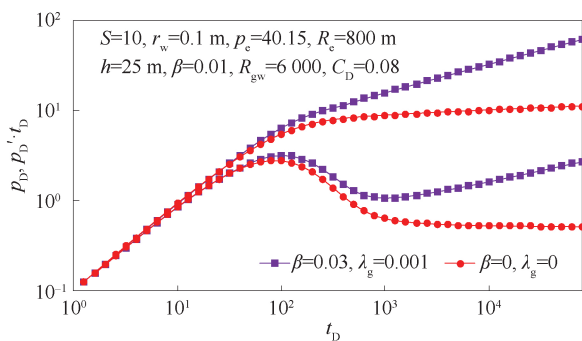


图6 无限大边界时非线性渗流特征对比双对数图

Fig.6 Comparison of nonlinear seepage characteristics versus double logarithm graph at infinite boundary

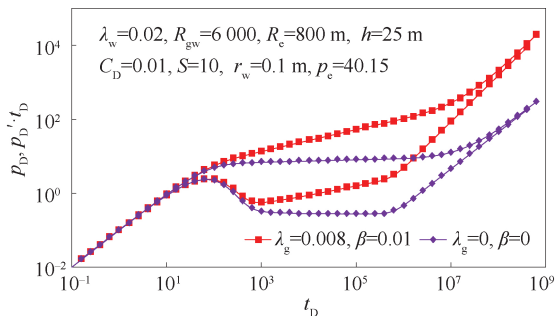


图7 封闭边界时非线性渗流特征对比双对数图

Fig.7 Comparison of nonlinear seepage characteristics versus log-log plot at closed boundary

在图5中可看出,气水比 $R_{gw}$ 越小,斜率为1的井筒储集效应阶段向左移动,同时压降曲线向上移动。因为 $R_{gw}$ 越小,产水量变大,地层中受到水相渗流阻力影响就会增大,压降损失就会增加。

在图6、图7中,开井初期启动压力及应力敏感效应均不会对井筒储集效应阶段产生影响,而是在地层流体径向流过程中影响流体压力特征。应力敏感效应会影响储层物性,并且随着生产进行储层压降增大应力敏感效应会越来越剧烈,易引起值0.5径向流水平段的消失,较大程度上影响试井解释的有效渗透率值;而启动压力为流体渗流的临界阀值,对压力特征的影响基本上是恒定的,对压力导数的影响幅度要小于应力敏感效应。

对于存在封闭边界的低渗储层,由于受到应力敏感效应的影响,储层渗透率发生下降<sup>[29-30]</sup>,压降及压力导数曲线发生上翘,值为0.5的径向流水平段消失,拟稳态的边界效应特征也受到影响。

### 3 实例分析

为验证文中模型在现场压力恢复试井数据的实际应用准确性,采用LX11-1气田LX11-1-S1井的数据进行计算。

LX11-1气田为疏松砂岩气藏,开发层位为盒8段,孔隙类型以岩屑溶蚀孔为主,其次为晶间孔,储层渗透率分布为0.15~8.50 mD,为低渗储层。LX11-1-S1井在2017年5月投产,投产初期日产气量 $8.46 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,5个月后产量递减快,井筒有积液,累积产水量为2907.02  $\text{m}^3$ ;2017年12月进行关井压力恢复测试。盒8层位孔隙度为0.185,气层厚度为10.2 m,气体黏度为0.021 mPa·s,综合压缩系数为0.037  $\text{MPa}^{-1}$ ,其岩相渗曲线及毛管压力曲线如图8所示。

LX11-1-S1井的压降及压力导数双对数拟合曲线如图9所示。可以看出,井筒储集效应之后的压降及压力导数曲线出现上翘情形,并不存在值为0.5的径向流水平段。由此可知,该储层物性参数在生产过程中发生变化,该气藏可能受到较为强烈的地层应力敏感效应。

采用试算法取非线性特征参数进行拟合结果比较,半对数拟合如图10所示。

根据最终拟合结果,可以得到数值试井解释结果,见表1。

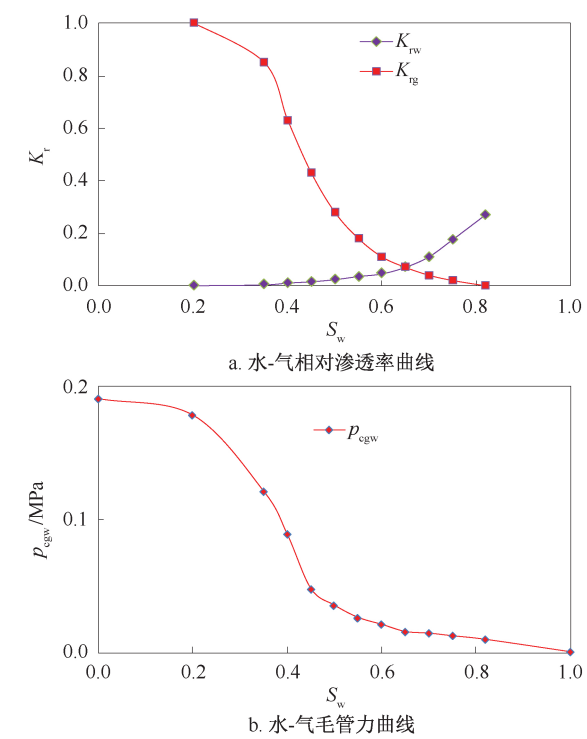


图 8 LX11-1-S1 井的岩心相渗曲线  
Fig.8 Core phase permeability curve of Well LX11-1-S1

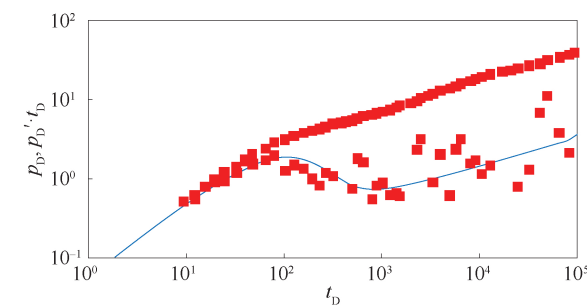


图 9 LX11-1-S1 井压降及压力导数双对数拟合曲线  
Fig.9 Log-log fitting curve of pressure drawdown and pressure derivative of Well LX11-1-S1

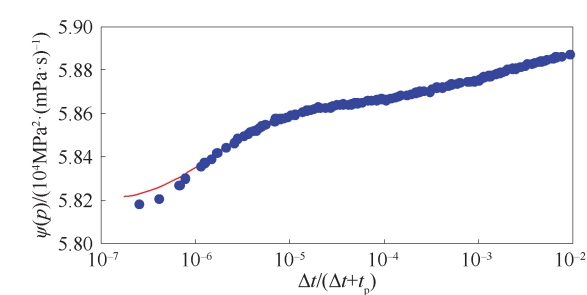


图 10 LX11-1-S1 井半对数拟合图  
Fig.10 Semi-log fit of Well LX11-1-S1

由试井解释结果可发现,气井产能受到应力敏感效应、启动压力梯度、井筒积液等因素的影响,近井地带呈现一定程度的污染;后期生产需调整工作制度,减小生产压差,避免应力敏感加重导致微小

孔隙吼道闭合、启动压力梯度增大,造成气井产能的伤害。

表 1 LX11-1-S1 井数值试井解释	
Table 1 Numerical well test interpretation of Well LX11-1-S1	
参数	参考值
气藏温度 $T/\text{K}$	371.55
原始地层压力 $p_e/\text{MPa}$	23.15
地层厚度 $h/\text{m}$	10.2
井筒储集系数 $C/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1})$	4.52
气水比 $R_{gw}$	7 000
应力敏感系数 $\beta$	0.008
水相启动压力梯度 $\lambda_w/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	0.009
气相启动压力梯度 $\lambda_g/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	0.002
地层原始渗透率 $K_i/\text{mD}$	2.53
表皮系数 $S$	8.7

## 4 结论

(1) 建立启动压力梯度及应力敏感效应下的气水两相渗流数值试井模型,通过有限差分及 IMPES 方法求解绘制出无限大边界、定压边界及封闭边界下的压降及压力导数图版。

(2) 对一些储层应力敏感效应严重或存在启动压力梯度影响的疏松砂岩来说,压降及压力导数曲线会发生上翘,值为 0.5 的径向流水平段消失,给含水气藏的试井解释工作带来了困难。

(3) 从双对数图版中可看出,气水比  $R_{gw}$  越小,产水量增大,斜率为 1 的井筒储集效应阶段向左移动,同时压降曲线向上移动。

(4) 在实际的含水气藏试井解释中的确存在着启动压力及应力敏感效应的影响,气水两相数值试井解释方法对该类气藏的压力恢复数据解释具有指导意义。

致谢:感谢科研项目“海上油田生物纳米解堵增注技术研究及应用(一期)”提供的研究平台及各位专家的悉心指导;感谢中海油服研究院同意该论文的发表。

## 参考文献

[1] 刘建军,刘先贵.有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J].地质力学学报,2001,7(1):41-44.  
LIU Jianjun, LIU Xiangui. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 41-44.  
[2] 朱华银,徐轩,安来志,等.致密气藏孔隙水赋存状态与流动性实验[J].石油学报,2016,37(2):230-236.  
ZHU Huayin, XU Xuan, AN Laizhi, et al. An experimental on occurrence and mobility of pore water in tight gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 230

- 236.
- [3] 杨满平,李允,李治平. 气藏含束缚水储层岩石应力敏感性实验研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3):227-229.  
YANG Manping, LI Yun, LI Zhiping. An experimental study on stress sensitivity of gas reservoir rock with irreducible water [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(3): 227-229.
  - [4] 张新红, 秦积舜. 低渗岩心物性参数与应力关系的试验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4): 56-60.  
ZHANG Xinhong, QIN Jishun. Relation of ground stress with the properties of low permeable core [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2001, 25(4): 56-60.
  - [5] 李嘉瑞, 张炜, 沈妍斐, 等. 富黏土低渗透砂岩应力敏感性实验和微观变形机理[J]. 断块油气田, 2011, 18(5):645-648.  
LI Jiarui, ZHANG Wei, SHEN Yanfei, et al. Stress sensitivity laboratory and microcosmic distortional mechanism of clay-rich and low permeability sandstone [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2011, 18(5): 645-648.
  - [6] 田冷, 何顺利, 李秀生. 低渗透气田砂岩储层应力敏感试井模型研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(6):89-92.  
TIAN Leng, HE Shunli, LI Xiusheng. Study of well test of stress sensitive sandstone in low permeability gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 89-92.
  - [7] 王欣, 齐梅, 胡永乐. 西加盆地 B 气田致密砂岩储层应力敏感评价[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2):85-88.  
WANG Xin, QI Mei, HU Yongle. Evaluation on stress sensitivity of tight sandstone in B gas field of western Canada basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 85-88.
  - [8] 王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 特低渗透应力敏感油藏数值模拟历史拟合方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(2):73-76.  
WANG Huan, LIAO Xinwei, ZHAO Xiaoliang, et al. History matching method of the numerical simulation for stress-sensitivity extra low-permeability oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(2): 73-76.
  - [9] 汪全林, 唐海, 吕栋梁, 等. 低渗透油藏启动压力梯度实验研究[J]. 油气地质与采收率. 2011, 18(1):97-100  
WANG Quanlin, TANG Hai, LYU Dongliang, et al. An experimental study on threshold pressure gradient in low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 97-100.
  - [10] 刘丽. 低渗透油藏启动压力梯度的应力敏感性实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2):81-83.  
LIU Li. Laboratory study on stress sensitivity of threshold pressure gradient in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 81-83.
  - [11] 刘峰, 王裕亮, 陈小凡, 等. 考虑应力敏感性的低渗透油藏油井产能分析[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1):124-128.  
LIU Feng, WANG Yuliang, CHEN Xiaofan, et al. Analysis on oil well productivity of low-permeability reservoirs with stress-sensitivity being taken into considerations [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 124-128.
  - [12] 谷建伟, 于秀玲, 马宁, 等. 考虑应力敏感的致密气藏水平井产能计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(6):57-62.  
GU Jianwei, YU Xiuling, MA Ning, et al. Productivity calculating method of the horizontal wells in tight gas reservoirs considering the stress sensitivity [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(6): 57-62.
  - [13] 汤连东, 陈小凡, 孙兆鑫, 等. 考虑应力敏感的低渗透底水油藏见水时间预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(3):60-63.  
TANG Liandong, CHEN Xiaofan, SUN Zhaoxin, et al. Prediction of the water breakthrough time for the low-permeability oil reservoir considering the stress sensitivity [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(3): 60-63.
  - [14] 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.
  - [15] 欧阳伟平. 致密气藏分段压裂水平井的不稳定压力与产量综合分析方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1):14-21.  
OUYANG Weiping. Comprehensive analysis method for transient pressure and production of multistage fractured horizontal well in tight gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 14-21.
  - [16] 蒋裕强, 李成勇, 曹成惠, 等. 高产气井试井压力资料异常原因分析[J]. 天然气工业, 2008, 28(7):90-92.  
JIANG Yuqiang, LI Chengyong, CAO Chenghui, et al. Reason analysis on abnormal pressure data from high-productivity gas well testing [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 90-92.
  - [17] BABA G A, NORSARAHADA A. The effect of water hammer on pressure oscillation of hydrogen natural gas transient flow [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 554(1):251-255.
  - [18] 杨朝蓬, 李星民, 刘尚奇, 等. 苏里格低渗致密气藏阈压效应[J]. 石油学报, 2015, 36(3):347-354.  
YANG Zhaopeng, LI Xingmin, LIU Shangqi, et al. Threshold pressure effect of low permeability tight gas reservoirs in Sulige gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 347-354.

- [19] 张洪, 李得信, 邱金权, 等. 低渗透油藏早期试井解释方法研究与应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(3):15-20.  
ZHANG Hong, LI Dexin, QIU Jinquan, et al. Research of well testing interpretation method for early stage data in low permeability reservoir and its application [J]. Well Testing, 2015, 24(3):15-20.
- [20] 李传亮. 岩石应力敏感指数与压缩系数之间的关系式[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4):95-98.  
LI Chuanliang. A theoretical formula of stress sensitivity index with compressibility of rock [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4):95-98.
- [21] 王江, 王玉英. 异常高压、特低渗透油藏储层压力敏感性研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(5):28-31.  
WANG Jiang, WANG Yuying. Study on the pressure sensitivity of abnormal high pressured and ultra-low permeable reservoirs [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(5):28-31.
- [22] 杨磊, 常志强, 朱忠谦, 等. 数值试井在克拉2气田开发中的应用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1):163-167.  
YANG Lei, CHANG Zhiqiang, ZHU Zhongqian, et al. Application of numerical well test in development of Kela2 gas field [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1):163-167.
- [23] 周克万, 黄炳光, 罗志锋, 等. 数值试井与不稳定试井结合计算物性参数[J]. 西南石油大学学报, 2011, 33(3):141-144.  
ZHOU Kewan, HUANG Bingguang, LUO Zhifeng, et al. Combination of numerical well test and unstable test for calculation of physical parameters [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2011, 33(3):141-144.
- [24] 齐二坡, 洪鸿, 田婉玲, 等. 数值试井技术在复杂气井解释中的应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(5):97-99.  
QI Erpo, HONG Hong, TIAN Wanling, et al. Application of numerical well test analysis in complex gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5):97-99.
- [25] 冯文光, 葛家理. 单一介质、双重介质中非定常非达西低速渗流问题[J]. 石油勘探与开发, 2005, 20(1):15-20.  
FENG Wenguang, GE Jiali. Problems with unsteady non-Darcy low rate flow in single medium and multiple medium [J]. Petroleum Exploitation and Development, 2005, 20(1):15-20.
- [26] 冯曦, 钟孚勋, 罗涛. 低渗透致密储层气井试井模型研究[J]. 天然气工业, 2008, 18(1):56-59.  
FENG Xi, ZHONG Fuxun, LUO Tao. Well testing model study on gas well in low permeability tight gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2008, 18(1):56-59.
- [27] 胡文瑞, 魏漪, 鲍敬伟. 中国低渗透油气藏开发理论与技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4):646-656.  
HU Wenrui, WEI Yi, BAO Jingwei. Development of the theory and technology for low permeability reservoirs in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4):646-656.
- [28] 姜瑞忠, 黄磊, 崔永正, 等. 考虑应力敏感效应的裂缝性复合油藏水平井压力动态分析[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(3):84-91.  
JIANG Ruizhong, HUANG Lei, CUI Yongzheng, et al. Transient pressure analysis of a horizontal well in fractured composite reservoirs with stress-sensitivity effect [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(3):84-91.
- [29] 游利军, 康毅力, 陈一健, 等. 含水饱和度和有效应力对致密砂岩有效渗透率的影响[J]. 天然气工业, 2004, 24(12):105-107.  
YOU Lijun, KANG Yili, CHEN Yijian, et al. Influence of water saturation and effective stress on permeability of tight sandstone [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(12):105-107.
- [30] 李天太, 刘小静, 唐继平, 等. 依南构造气藏储层地质特征及伤害因素实验研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(1):76-78.  
LI Tiantai, LIU Xiaojing, TANG Jiping, et al. Reservoir geologic characteristics and experimental study on damage factors in Yinan structure conglomerate gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(1):76-78.

编辑 刘述忍

**第一作者简介:**冯青,男,1987年出生,硕士,工程师,2013年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,从事非常规储层渗流力学、试井、数值模拟等油气田开发方面科研工作。电话:022-59551929, 15222118220; Email: fengqing2@cosl.com.cn。通信地址:天津市滨海新区塘沽海洋高新技术开发区海川路1581号,邮政编码:300459。