◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.201705015

考虑启动压力梯度和应力敏感的页岩油井产能分析

刘礼军[1]，姚 军[1]，孙 海[1]，白玉湖[2]，徐兵祥[2]，陈 岭[2]

(1. 中国石油大学(华东)油气渗流研究中心，青岛 266580；2. 中海油研究总院，北京 100028)

摘 要：为研究启动压力梯度及应力敏感效应对页岩油井产能的影响规律，基于油气水三相渗流模型，建立了考虑启动压力梯度和应力敏感效应的页岩油渗流数学模型，给出了数值求解方法，并编制了页岩油藏数值模拟器。利用页岩油藏数值模拟器分析了启动压力梯度和应力敏感效应对多级压裂页岩油水平井产能的影响规律。页岩油藏数值模拟器退化计算结果与 Eclipse 软件的计算结果基本吻合，验证了模拟器的准确性。数值模拟结果表明：当启动压力梯度达到 0.5 MPa/m 时，生产 10 000 d 的累计产油量为无启动压力梯度时的 24.7%；当应力敏感系数由 0.1 MPa^{-1} 升至 0.5 MPa^{-1} 时，生产 10 000 d 时储层近井地带的渗透率降低近一个数量级，累计产油量为无应力敏感效应时的 36.2%；同时考虑启动压力梯度和应力敏感效应时，累计产油量更低。研究结果表明，启动压力梯度和应力敏感效应对页岩油井的产能均有较大的抑制作用，如不考虑启动压力梯度和应力敏感效应会过高估计页岩油井的产能，页岩油藏数值模拟器可为页岩油藏的开发提供指导。

关键词：页岩油；启动压力梯度；应力敏感；产能

中图分类号：TE32+8 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-0890(2017)05-0084-08

The Effect of Threshold Pressure Gradient and Stress Sensitivity on Shale Oil Reservoir Productivity

LIU Lijun[1], YAO Jun[1], SUN Hai[1], BAI Yuhu[2], XU Bingxiang[2], CHEN Ling[2]

(1. *Research Centre of Multiphase Flow in Porous Media, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China*; 2. *CNOOC Research Institute, Beijing, 100028, China*)

Abstract: In order to research on the effect of threshold pressure gradient and stress sensitivity on shale oil well productivity, a mathematical model that takes into consideration of the threshold pressure gradient and stress sensitivity for shale oil seepage was developed on the basis of oil-gas-water three-phase seepage model. A numerical solution method was offered and numerical simulator of shale oil reservoir was compiled. Patterns and mathematical rules for threshold pressure gradient and stress sensitivity on horizontal well productivity of multistage fracturing shale oil reservoir were analyzed by using a shale oil reservoir numerical simulator. The calculation results on the degradation of the simulator were basically identical with Eclipse software calculation results, which validated the correctness of the simulator. The numerical simulation results showed that the cumulative oil production rate for 10 000 days was 24.7% of that where there was no threshold pressure gradient when threshold pressure gradient reached 0.5 MPa/m. When the stress sensitivity coefficient rose from 0.1 MPa^{-1} to 0.5 MPa^{-1}, the reservoir permeability near borehole zones dropped approximately one order of magnitude and the cumulative oil production rate was 36.2% that of no stress sensitivity effect after 10 000 days' production. Moreover, the cumulative oil production was lower while simultaneously considering threshold pressure gradient and stress sensitivity effect. The results showed that the threshold pressure gradient and stress sensitivity effect both greatly inhibited shale oil productivity and the shale oil productivity might be overestimated without consideration of the threshold pressure gradient and stress sensitivity effect. Therefore a shale oil reservoir numerical simulator can provide guidance for the development of shale oil reservoirs.

Key words: shale oil; threshold pressure gradient; stress sensitivity; productivity

页岩油储层发育大量的纳米级孔隙，微裂缝也非常发育，属于超低渗透的致密储层，需要通过大规模压裂形成纳米级孔隙-微裂缝-大裂缝共存的多尺度页岩储层[1]，才能有效开发。页岩油储层具有超低渗透特性，经大规模压裂后又存在多尺度孔隙空间，其渗流机理和流动特征均与常规油气藏不同[2]，因此，明确页岩油藏的复杂渗流机理对页岩油开发具有重要意义。国内外学者对页岩油藏的渗流机理

收稿日期：2017-05-19；**改回日期**：2017-09-07。

作者简介：刘礼军(1993—)，男，山东海阳人，2016 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业，在读博士研究生，主要从事油气田开发工程技术研究工作。E-mail：liulijunupc@163.com。

基金项目：国家自然科学基金项目“页岩油气多尺度渗流特征与开采理论”(编号：51490654)、中海石油(中国)有限公司综合科研项目“海外页岩油气产能评价技术与方法研究”(编号：YXKY-2016-ZY-03)、中央高校基本科研业务费专项资金“页岩油储层多尺度数字岩心构建及流动机制研究”(编号：17CX02008A)及国家科技重大专项“基于数字岩心的页岩气藏微观流动模拟及产能评价方法研究”(编号：2016ZX05061-14)联合资助。

进行了多方面的研究:高英等人[3]认为页岩油渗流为低速非达西渗流,具有启动压力梯度,渗透率越小启动压力梯度越大,并基于分形理论建立了页岩油藏压裂井的产能解析模型;郭肖等人[4]在建立页岩渗透率模型时考虑了应力敏感效应的影响,分析了储层压力对渗透率的影响,发现渗透率随储层压力降低而降低;S. S. Chhatre 等人[5]通过稳态试验发现页岩的渗透率随净围压升高而降低,且两者呈指数关系。针对页岩油储层中存在的微裂缝和人工大裂缝,传统的数值模拟方法通常采用双重介质模型[6]和网格加密等方式处理,但双重介质模型在处理页岩油藏中的非稳态窜流时通常误差较大[7],网格加密会增加计算量,且难以处理具有复杂分布特征的大裂缝。MINC(multiple interacting continua)模型[8]将基质网格划分为嵌套网格,解决了基质与微裂缝间的非稳态窜流问题。嵌入式离散裂缝模型[9-10]将裂缝单元直接嵌入结构化网格中,有效减少了网格量,且易于模拟复杂的裂缝。

截至目前,许多学者分析研究了启动压力梯度和应力敏感对低渗透油气藏的影响[11-17],但都存在不足或不完善之处,如:杨仁锋等人[16]考虑启动压力梯度和压敏效应,对特低渗透油藏的非线性渗流进行了数值模拟,取得了一定的认识,但其以直井为研究对象,未考虑多级压裂及微裂缝发育的情况;熊健等人[17]考虑启动压力梯度、滑脱及应力敏感等效应,推导了非线性渗流下低渗气藏压裂井的产能方程,但其建立的物理模型较为简单,也未考虑大量微裂缝发育的情况。为此,笔者建立了考虑启动压力梯度和应力敏感效应的页岩油藏渗流数学模型,采用有限体积法对其进行离散求解,并采用 MINC 模型和嵌入式离散裂缝模型处理页岩储层中的微裂缝和大裂缝,有效解决了多尺度孔隙特征下页岩油藏中的油气渗流问题,并在此基础上分析了启动压力梯度和应力敏感效应对页岩油井产能的影响程度。

1　页岩油藏渗流数学模型的建立

页岩油密度低,一般含有溶解气,且地层水可能参与流动,因此建立页岩油藏油、气、水三相渗流数学模型时,根据文献[18]作以下基本假设:1)页岩油藏中的渗流为等温渗流;2)油相和水相的渗流考虑启动压力梯度和应力敏感,气相渗流考虑应力敏感;3)页岩油藏烃类只含油和气 2 种组分,油组分只存在于油相中,气组分可存在于气相和油相中;4)油、气不溶于水。

1.1　启动压力梯度

页岩油储层的渗透率极低,一般为纳达西量级,具有明显的非线性渗流特征[3]。考虑启动压力梯度的渗流运动方程为:

$$v=\begin{cases}-\dfrac{KK_r}{\mu}\left(1-\dfrac{G}{|\nabla\psi|}\right)\nabla\psi & |\nabla\psi|>G\\ 0 & |\nabla\psi|\leqslant G\end{cases}\tag{1}$$

式中:v 为渗流速度,m/s;K_r 为相对渗流率;K 为渗透率,D;μ 为黏度,Pa·s;G 为启动压力梯度,Pa/m;$\nabla\psi$ 为势梯度,Pa/m。

1.2　应力敏感效应

在页岩油开采过程中,储层压力下降使岩石所受有效应力增加,从而导致储层渗透率降低。页岩渗透率与有效应力之间的关系式为[19-20]:

$$K=K_0\mathrm{e}^{-c(p-p_0)}\tag{2}$$

式中:K_0 为原始状态下的渗透率,D;p_0 为原始油藏压力,Pa;c 为应力敏感系数,Pa^{-1}。

1.3　数学模型

页岩油藏中油、气、水三相的渗流数学模型为:

$$-\nabla\cdot(\rho_o\boldsymbol{v}_o)+q_o=\frac{\partial(\phi\rho_o S_o)}{\partial t}\tag{3}$$

$$-\nabla\cdot(\rho_{go}\boldsymbol{v}_o+\rho_g\boldsymbol{v}_g)+q_g=\frac{\partial[\phi(\rho_{go}S_o+\rho_g S_g)]}{\partial t}\tag{4}$$

$$-\nabla\cdot(\rho_w\boldsymbol{v}_w)+q_w=\frac{\partial(\phi\rho_w S_w)}{\partial t}\tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{v}_o$,$\boldsymbol{v}_g$ 和 $\boldsymbol{v}_w$ 分别为油、气、水相的渗流速度,m/s;ρ_o 和 ρ_{go} 分别为油相中油组分和溶解气组分的密度,$\mathrm{kg/m^3}$;ρ_g 和 ρ_w 分别为气相和水相的密度,$\mathrm{kg/m^3}$;q_o,q_g 和 q_w 分别为油、气、水组分的源汇项,即单位时间内单位地层体积的产出或注入量,$\mathrm{kg/(m^3\cdot s)}$;ϕ 为孔隙度;S_o,S_g 和 S_w 为油、气、水相的饱和度。

此外,为了使方程组封闭,还需要如下辅助方程:

$$S_o+S_g+S_w=1\tag{6}$$

$$p_w=p_o-p_{cow}\tag{7}$$

$$p_g=p_o-p_{cog}\tag{8}$$

式中:p_o,p_g 和 p_w 分别为油、气、水相的压力,Pa;p_{cow} 和 p_{cog} 为油水和油气的毛管力,Pa。

由式(1)—式(8)组成的方程组即为页岩油藏渗

流数学模型。

2 页岩油藏渗流模型数值求解

2.1 数值离散格式

采用有限体积法对页岩油藏渗流数学模型进行数值离散，即对渗流基本方程式(3)—(5)进行积分，然后进行积分离散，并将运动方程式(1)代入可得到渗流数学模型的数值离散格式：

$$\sum_{m\in\eta_n}\left[(\rho_o\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{nm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})-\frac{(\rho_o\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{Gnm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})}{|\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on}|}\right]+(Vq_o)^{t+1}_n=\frac{(V\phi\rho_oS_o)^{t+1}_n-(V\phi\rho_oS_o)^t_n}{\Delta t} \tag{9}$$

$$\sum_{m\in\eta_n}\left[(\rho_{go}\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{nm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})-\frac{(\rho_{go}\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{Gnm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})}{|\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on}|}\right]+(\rho_g\lambda_g)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{nm}(\psi^{t+1}_{gm}-\psi^{t+1}_{gn})+(Vq_g)^{t+1}_n=\frac{[V\phi(\rho_{go}S_o+\rho_gS_g)]-[V\phi(\rho_{go}S_o+\rho_gS_g)]^t_n}{\Delta t} \tag{10}$$

$$\sum_{m\in\eta_n}\left[(\rho_w\lambda_w)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{nm}(\psi^{t+1}_{wm}-\psi^{t+1}_{wn})-\frac{(\rho_w\lambda_w)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{Gnm}(\psi^{t+1}_{wm}-\psi^{t+1}_{wn})}{|\psi^{t+1}_{wm}-\psi^{t+1}_{wn}|}\right]+(Vq_w)^{t+1}_n=\frac{(V\phi\rho_wS_w)^{t+1}_n-(V\phi\rho_wS_w)^t_n}{\Delta t} \tag{11}$$

$$\psi=p-\rho gD \tag{12}$$

式中：λ 为流度，$\lambda_i=K_i/u_i(i=o,g,w)$，$(Pa\cdot s)^{-1}$；下标 $nm+\frac{1}{2}$ 表示在网格 n 和 m 界面上的平均；η_n 为网格 n 的所有邻近网格；$t+1$ 为当前时间步；t 为上一时间步；γ 为传导系数，$\gamma_{nm}=A_{nm}K_{nm+\frac{1}{2}}/(d_n+d_m)$，$m^3$；$\gamma_{Gnm}=GA_{nm}K_{nm+\frac{1}{2}}$，$MPa\cdot m^3$；$d_n$ 和 d_m 分别为网格单元 n 和 m 中心到两者界面的距离，m；A_{nm} 为网格 n 和 m 间的界面面积，m^2；$K_{nm+\frac{1}{2}}$ 为网格 n 和 m 的平均渗透率，D；K_n 和 K_m 分别为网格 n 和 m 的渗透率，$K_{nm+\frac{1}{2}}=K_nK_m/(K_nd_m+K_md_n)$，D；V 为网格 n 的体积，m^3；Δt 为时间步长，s；p 为流体压力，Pa；ρ 为流体密度，kg/m^3；D 为深度，m。

根据离散格式的方程式(9)—(11)，得到方程的残差格式为：

$$R^{t+1}_{o,n}=\sum_{m\in\eta_n}\left[(\rho_o\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{nm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})-\frac{(\rho_o\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{Gnm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})}{|\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on}|}\right]+(Vq_o)^{t+1}_n-\frac{(V\phi\rho_oS_o)^{t+1}_n-(V\phi\rho_oS_o)^t_n}{\Delta t} \tag{13}$$

$$R^{t+1}_{g,n}=\sum_{m\in\eta_n}\left[(\rho_{go}\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{nm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})-\frac{(\rho_{go}\lambda_o)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{Gnm}(\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on})}{|\psi^{t+1}_{om}-\psi^{t+1}_{on}|}+(\rho_g\lambda_g)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{gn}(\psi^{t+1}_{gm}-\psi^{t+1}_{gn})\right]+(Vq_g)^{t+1}_n-\frac{[V\phi(\rho_{go}S_o+\rho_gS_g)]^{t+1}_n-[V\phi(\rho_{go}S_o+\rho_gS_g)]^t_n}{\Delta t} \tag{14}$$

$$R^{t+1}_{w,n}=\sum_{m\in\eta_n}\left[(\rho_w\lambda_w)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}r^{t+1}_{nm}(\psi^{t+1}_{wm}-\psi^{t+1}_{wn})-\frac{(\rho_w\lambda_w)^{t+1}_{nm+\frac{1}{2}}\gamma^{t+1}_{Gnm}(\psi^{t+1}_{wm}-\psi^{t+1}_{wn})}{|\psi^{t+1}_{wm}-\psi^{t+1}_{wn}|}\right]+(Vq_w)^{t+1}_n-\frac{(V\phi\rho_wS_w)^{t+1}_n-(V\phi\rho_wS_w)^t_n}{\Delta t} \tag{15}$$

式中：$R_{o,n}$，$R_{g,n}$ 和 $R_{w,n}$ 分别为油、气、水渗流方程的残差。

式(13)—式(15)构成了页岩油藏渗流数学模型的全隐式数值格式，可通过牛顿迭代法对方程组进行求解，将求解过程编制为计算程序就形成了页岩油藏数值模拟器。

2.2 微裂缝及大裂缝的处理

采用 MINC 模型和嵌入式离散裂缝模型处理储层中存在的微裂缝和大裂缝。上述 2 种模型的核心为网格连接信息的处理。MINC 模型是在双重介质的基础上，将基质网格进一步细分为嵌套网格，并基于网格划分情况计算网格间的连接信息，如网格间中心距离、网格间界面面积，具体计算可参考文献[8]。嵌入式离散裂缝模型是将大裂缝直接嵌入到规则的基质网格中，计算大裂缝网格与基质网格间的连接信息[10]。MINC 模型及嵌入式离散裂缝模型划分所得的网格见图 1，对应的网格连接关系见图 2。采用 MINC 模型和嵌入式离散裂缝模型对微裂缝和大裂缝的处理形成网格前处理模块，其与页岩油藏数值模拟器结合，便可对采用多级压裂水平井开发的页岩油藏进行模拟分析。

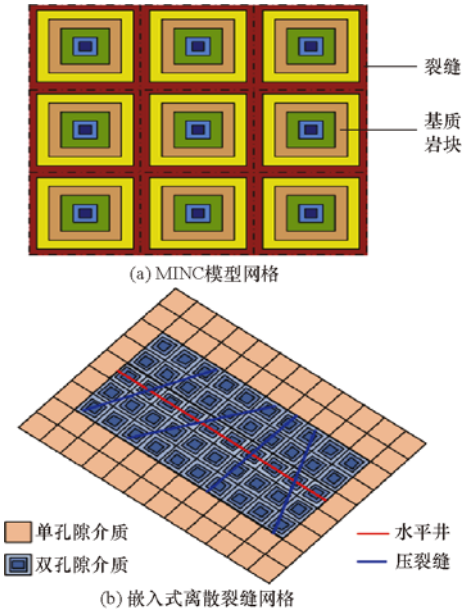

图 1　网格示意

Fig. 1　Schematic diagram of grid block

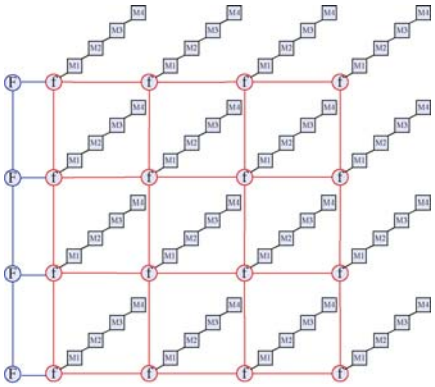

图 2　网格连接关系示意

Fig. 2　Schematic diagram of grid connections

3　模型验证

商业模拟器在功能上存在局限，且启动压力梯度及应力敏感的数学表达式有多种形式，因此对笔者所编制的模拟器进行了退化验证（$c=0\ \mathrm{Pa}^{-1}$，$G=0\ \mathrm{Pa/m}$）。采用笔者所编模拟器和 Eclipse 软件对一个二维页岩油藏模型（见图 3）进行了模拟，并对比了模拟结果。二维页岩油藏模型的外边界封闭，水平井以井底流压 25 MPa 进行定压生产，原始油藏压力为 31.27 MPa，网格数为 100×51×1，3 个方向上网格尺寸均为10 m，渗透率为 0.1 μD，孔隙度为 0.08，地层水的黏度为 1.000 mPa·s，原油黏度为 0.132 mPa·s，束缚水饱和度为 0.22，水力裂缝的渗透率为 4 D，开度为 0.001 m。

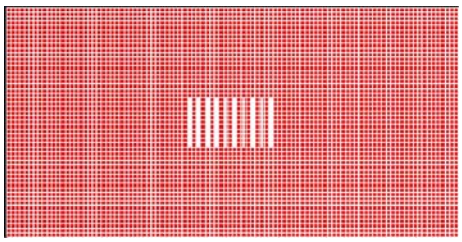

图 3　二维页岩油藏的物理模型

Fig. 3　Physical model of 2D shale oil reservoir

图 4 所示为分别用 Eclipse 软件和笔者所编模拟器模拟该油藏生产 10 000 d 时的压力分布。从图 4 可以看出，笔者所编模拟器模拟得到的压力分布与 Eclipse 软件模拟得到的压力分布基本吻合。

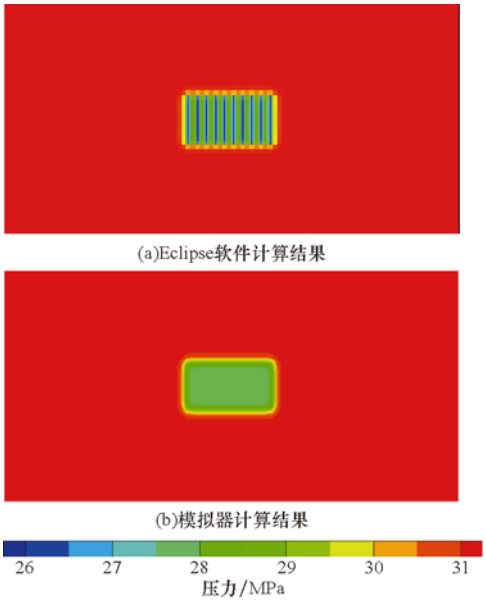

图 4　压力分布模拟结果

Fig. 4　Simulation results of pressure distribution

图 5 所示为用 Eclipse 软件和笔者所编模拟器计算得到的生产 10 000 d 的日产油量和累计产油量。从图 5 可以看出，笔者所编模拟器计算得到的日产油量和累计产油量与 Eclipse 软件计算的结果基本吻合。

通过对比笔者所编模拟器与 Eclipse 软件的模拟结果，验证了笔者所建立数学模型的准确性。

4　产能影响因素分析

4.1　启动压力梯度对产能的影响

为了研究在定压衰竭开采条件下启动压力梯度对页岩油井产能的影响，利用模拟器对不同启动压力梯度下页岩油井的产能进行了模拟，模拟条件与模型验证时相同。此外，在上述油藏物理模型的基础上加入微裂缝，微裂缝孔隙度为 0.002%，渗透率

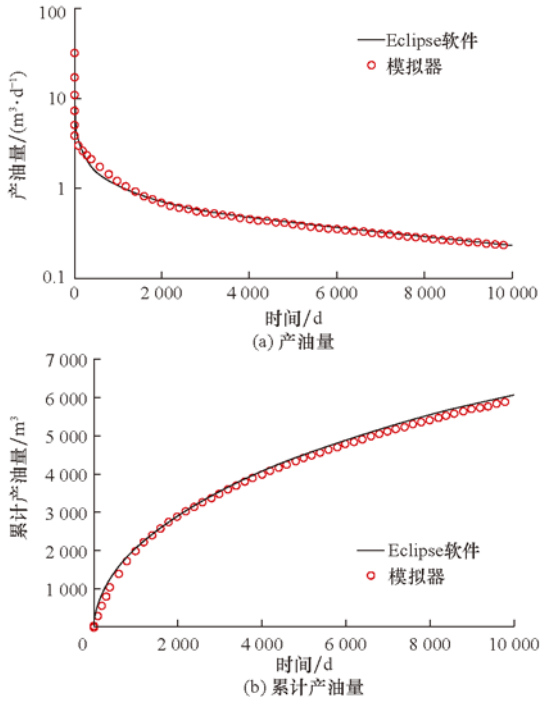

图 5　产油量和累计产油量的模拟结果

Fig. 5　Simulation results of daily oil production and cumulative oil production

为 0.1 mD，微裂缝间距为 10 m，井底压力为 21 MPa。启动压力梯度分别取 0.1 和 0.5 MPa/m[21]。

图 6 所示为不同启动压力梯度下生产 10 000 d 时的压力分布。由图 6 可知，启动压力梯度的存在抑制了压力波的传播，随着页岩油藏启动压力梯度的增大，压力波的扩散范围缩小。

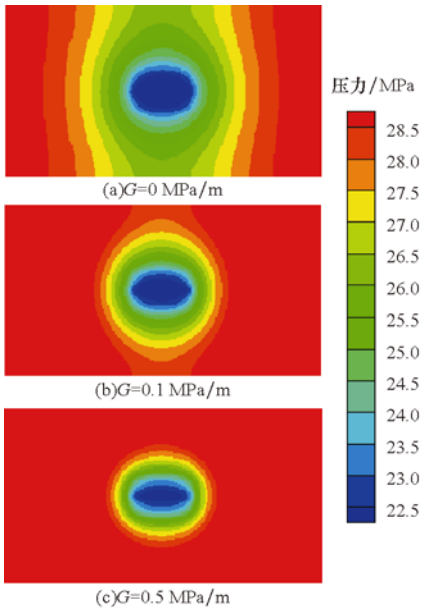

图 6　不同启动压力梯度下的压力分布

Fig. 6　Pressure distribution under different threshold pressure gradient

图 7 为不同启动压力梯度下生产 10 000 d 的日产油量和累计产油量。从图 7 可以看出，随启动压力梯度增大，页岩油井的产油量降低，当启动压力梯度升至 0.5 MPa/m 时，生产 10 000 d 时的累计产油量降为无启动压力梯度的 24.7%。启动压力梯度的影响与生产压差有关，随着生产压差增大，启动压力梯度的影响逐渐减弱，但总的来说，启动压力梯度对页岩油井产能具有较大的抑制作用。

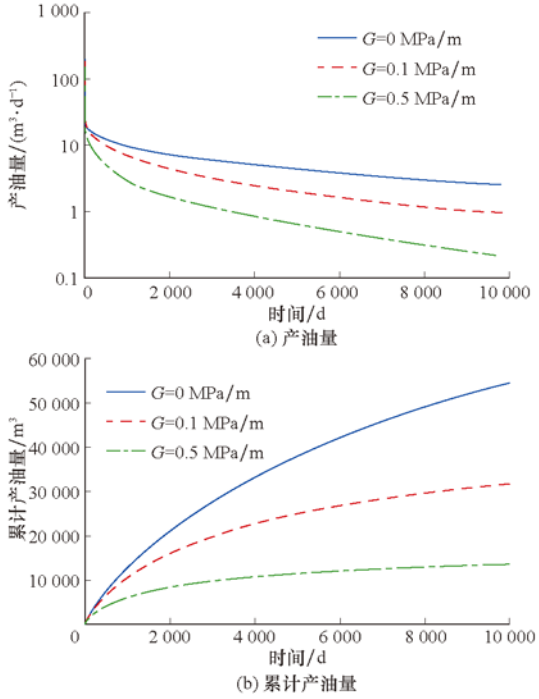

图 7　不同启动压力梯度下的页岩油井的产油量

Fig. 7　Shale oil production under different threshold pressure gradient

4.2　应力敏感效应对产能的影响

为了研究在定压衰竭开采条件下应力敏感效应对页岩油井产能的影响，对不同应力敏感系数下页岩油井的产能进行了模拟，模拟条件与模型验证时相同。假设基质、微裂缝和大裂缝的应力敏感系数相同，并分别取 0.1，0.3 和 0.5 MPa^{-1}[22]。

由于页岩油藏基质的渗透率极低，对页岩油流动贡献很小，而微裂缝为主要的页岩油渗流通道，因此分析微裂缝渗透率在应力敏感效应下的响应，对于认识页岩油井的产能规律具有重要的指导作用。图 8 所示为不同应力敏感系数下生产 10 000 d 时微裂缝的渗透率分布。从图 8 可以看出，在开发页岩油的过程中，应力敏感效应会使微裂缝的渗透率降低，尤其是近井地带，而且随着应力敏感系数增

大,微裂缝渗透率下降幅度增大,当应力敏感系数由 0.1 MPa^{-1}升至 0.5 MPa^{-1}时,生产 10 000 d 时近井处微裂缝的渗透率降低近一个数量级。

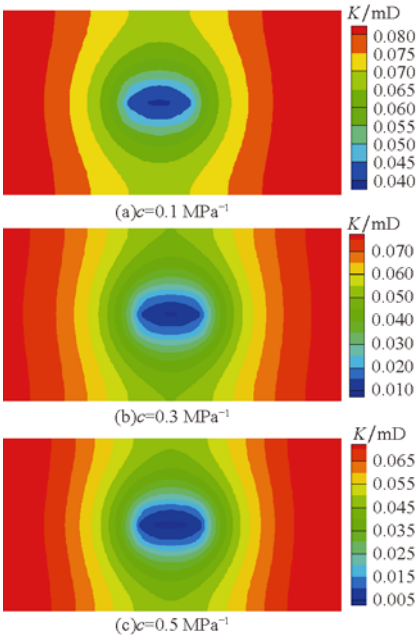

图 8　不同应力敏感系数下的微裂缝渗透率分布

Fig. 8　Micro-fracture permeability distribution with different stress sensitivity coefficientst

图 9 所示为不同应力敏感系数下生产 10 000 d 时的日产油量和累计产油量。从图 9 可以看出:应力

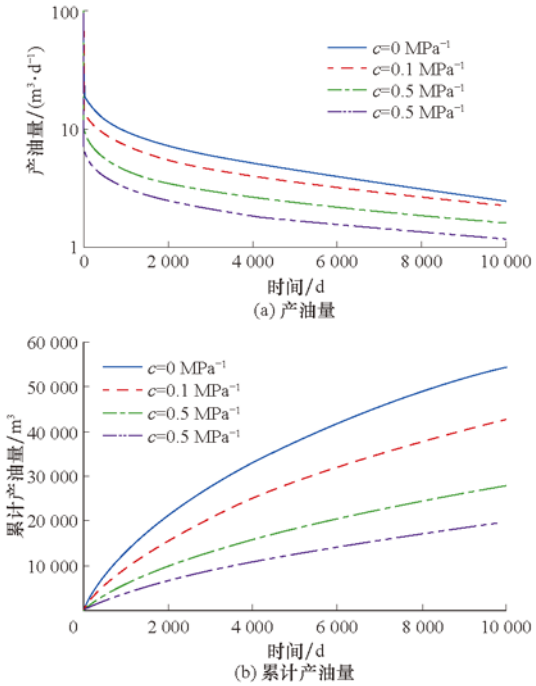

图 9　不同应力敏感系数下的页岩油井的产油量

Fig. 9　Shale oil production with different stress sensitivity coefficients

敏感效应的影响主要体现在开发初期,这主要是由于开发初期储层压力下降快,大裂缝、微裂缝及基质的渗透率下降快,从而导致开发初期油井的产油量大幅降低,当进入开发后期,储层压力变化平缓,产油量变平稳;应力敏感效应对油井产能影响显著,当应力敏感系数达到 0.5 MPa^{-1}时,生产 10 000 d 的累计产油量为无应力敏感效应的 36.2%。同样,应力敏感效应的影响与生产压差有关,随着生产压差增大,应力敏感效应的影响逐渐显著。总体来说,应力敏感效应对页岩油井产能具有很大的抑制作用。

4.3　应力敏感系数及启动压力梯度对产能的影响

对不同应力敏感系数及启动压力梯度参数组合下页岩油井的产能进行了模拟,模拟条件与模型验证时相同。应力敏感系数和启动压力分别取 0.3 MPa^{-1}、0.3 MPa/m 和 0.5 MPa^{-1}、0.5 MPa/m。

图 10 所示为不同应力敏感系数和启动压力梯度组合下生产 10 000 d 时的日产油量和累计产油量。从图 10 可以看出,同时考虑应力敏感和启动压力梯度与不考虑或只考虑应力敏感(启动压力梯度)相比,页岩油井产油量的递减速度更快,当应力敏感系数和启动压力梯度为 0.5 MPa^{-1} 和 0.5 MPa/m

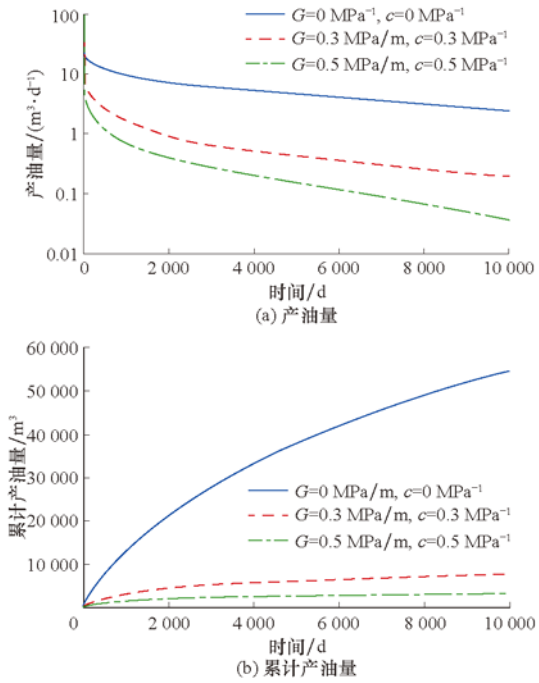

图 10　考虑应力敏感系数和启动压力梯度时页岩油井的产油量

Fig. 10　Shale oil production with consideration of stress sensitivity coefficient and threshold pressure gradients

时，生产 10 000 d 的累计产油量为不考虑应力敏感和启动压力梯度时的 5.72%。由此可见，应力敏感和启动压力梯度对页岩油井的产能具有很大的影响，不考虑应力敏感和启动压力梯度会极大地高估页岩油井的产能，因此在模拟页岩油藏开发产过程中，必须考虑应力敏感系数和启动压力梯度的影响。

5 结 论

1）在考虑启动压力梯度和应力敏感效应的基础上，建立了页岩油藏油、气、水三相渗流数学模型，给出了模型的数值求解方法，并编制了页岩油藏数值模拟器。

2）数值模拟结果表明：启动压力梯度与应力敏感效应对页岩油井的产能均有较大的抑制作用。启动压力梯度减缓了压力波的传播，当启动压力梯度达到 0.5 MPa/m 时，生产 10 000 d 时的累计产油量为无启动压力梯度时的 24.7%；应力敏感效应使开发中页岩油储层的渗透率降低，尤其是近井区域，当应力敏感系数由 0.1 MPa^{-1} 升至 0.5 MPa^{-1} 时，生产 10 000 d 时近井区域的渗透率降低近一个数量级，油井累计产油量为无应力敏感时的 36.2%；同时考虑启动压力梯度和应力敏感效应时，页岩油井的产能更低。

3）页岩油藏的渗流机理复杂，目前对页岩油的渗流机理认识不足。因此，下一步应着重开展页岩油藏的微观渗流机理研究，完善页岩油的渗流数学模型，从而指导页岩油藏的开发。

参 考 文 献
References

[1] 盛湘，陈祥，章新文，等. 中国陆相页岩油开发前景与挑战[J]. 石油实验地质，2015，37(3)：267-271.
SHENG Xiang，CHEN Xiang，ZHANG Xinwen，et al. Prospects and challenges of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Geology and Experiment，2015，37(3)：267-271.

[2] 姚军，孙致学，张凯，等. 非常规油气藏开采中的工程科学问题及其发展趋势[J]. 石油科学通报，2016，1(1)：128-142.
YAO Jun，SUN Zhixue，ZHANG Kai，et al. Scientific engineering problems and development trends in unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin，2016，1(1)：128-142.

[3] 高英，朱维耀，岳明，等. 体积压裂页岩油储层渗流规律及产能模型[J]. 东北石油大学学报，2015，39(1)：80-86.
GAO Ying，ZHU Weiyao，YUE Ming，et al. Seepage law and productivity model of stimulated reservoir volume in shale oil reservoirs[J]. Journal of Northeast Petroleum University，2015，39(1)：80-86.

[4] 郭肖，任影，吴红琴. 考虑应力敏感和吸附的页岩表观渗透率模型[J]. 岩性油气藏，2015，27(4)：109-112，118.
GUO Xiao，REN Ying，WU Hongqin. Apparent permeability model of shale gas considering stress sensitivity and adsorption [J]. Lithologic Reservoirs，2015，27(4)：109-112，118.

[5] CHHARTE S S，SINHA S，BRAUN E M，et al. Effect of stress，creep，and fluid type on steady state permeability measurements in tight liquid unconventional reservoirs[C]//Unconventional Resources Technology Conference，August 25-27，Denver，Colorado，USA，2014.

[6] 孙海，姚军，孙致学，等. 页岩气数值模拟技术进展及展望[J]. 油气地质与采收率，2012，19(1)：46-49.
SUN Hai，YAO Jun，SUN Zhixue，et al. Recent development and prospect on numerical simulation of shale gas reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2012，19(1)：46-49.

[7] 严侠，黄朝琴，姚军，等. 裂缝性油藏改进多重子区域模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2016，40(3)：121-129.
YAN Xia，HUANG Zhaoqin，YAO Jun，et al. An improved multiple sub-region method for flow simulation of fractured reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)，2016，40(3)：121-129.

[8] PRUESS K，NARASIMHAN T N. Practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media[J]. Society of Petroleum Engineers Journal，1985，25(1)：14-26.

[9] LEE S H，LOUGH M F，JENSEN C L. Hierarchical modeling of flow in naturally fractured formations with multiple length scales[J]. Water Resources Research，2001，37(3)：443-455.

[10] LI Liyong，LEE S H. Efficient field-scale simulation of black oil in a naturally fractured reservoir through discrete fracture networks and homogenized media[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering，2008，11(4)：750-758.

[11] 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.

[12] 王敬，刘慧卿，刘仁静，等. 考虑启动压力和应力敏感效应的低渗、特低渗油藏数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32(增刊 2)：3317-3327.
WANG Jing，LIU Huiqing，LIU Renjing，et al. Numerical simulation for low-permeability and extra-low permeability reservoirs with considering starting pressure and stress sensitivity effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2013，32(supplement 2)：3317-3327.

[13] 曲占庆，翟恒立，田相雷，等. 考虑压敏效应的变启动压力梯度试验研究[J]. 石油钻探技术，2012，40(3)：78-82.
QU Zhanqing，ZHAI Hengli，TIAN Xianglei，et al. Experimental research on variable threshold pressure gradient con-

sidering pressure sensitive effect[J]. Petroleum Drilling Techniques,2012,40(3):78-82.

[14] 张庆辉,李相方,张磊,等.考虑启动压力梯度的低渗底水气藏见水时间预测[J].石油钻探技术,2012,40(5):96-99.
ZHANG Qinghui,LI Xiangfang,ZHANG Lei,et al. Prediction of water breakthrough time in low permeability gas reservoirs with bottom water in consideration of threshold pressure[J]. Petroleum Drilling Techniques,2012,40(5):96-99.

[15] 张楠,王晓琴,徐锋,等.启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透油藏直井产能的影响[J].特种油气藏,2012,19(1):74-77.
ZHANG Nan,WANG Xiaoqin,XU Feng,et al. Effects of kickoff pressure gradient and stress sensitivity on the productivity of vertical wells in low permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2012,19(1):74-77.

[16] 杨仁锋,姜瑞忠,刘世华,等.特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J].石油学报,2011,32(2):299-306.
YANG Renfeng,JIANG Ruizhong,LIU Shihua,et al. Numerical simulation of nonlinear seepage in ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica,2011,32(2):299-306.

[17] 熊健,邱桃,郭平,等.非线性渗流下低渗气藏压裂井产能评价[J].石油钻探技术,2012,40(3):92-96.
XIONG Jian,QIU Tao,GUO Ping,et al. Production evaluation of fractured wells in low permeability reservoirs with nonlinear flow[J]. Petroleum Drilling Techniques,2012,40(3):92-96.

[18] 韩大匡,陈钦雷,闫存章.油藏数值模拟基础[M].北京:石油工业出版社,1993.
HAN Dakuang,CHEN Qinlei,YAN Cunzhang. Basis of reservoir numerical simulation[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1993.

[19] 张睿,宁正福,杨峰,等.微观孔隙结构对页岩应力敏感影响的实验研究[J].天然气地球科学,2014,25(8):1284-1289.
ZHANG Rui,NING Zhengfu,YANG Feng,et al. Experimental study on microscopic pore structure controls on shale permeability under compaction process[J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(8):1284-1289.

[20] JU Binshan,WU Yushu,FAN Tailiang. Study on fluid flow in nonlinear elastic porous media:experimental and modeling approaches[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2011,76(3/4):205-211.

[21] 杨琼,聂孟喜,宋付权.低渗透砂岩渗流启动压力梯度[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(12):1650-1652.
YANG Qiong,NIE Mengxi,SONG Fuquan. Threshold pressure gradient of low permeability sandstone[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(12):1650-1652.

[22] REYES L,OSISANYA S O. Empirical correlation of effective stress dependent shale rock properties[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology,2002,41(12):47-53.

[编辑　刘文臣]

《石油钻探技术》加入“中文精品学术期刊外文版数字出版工程”

近日,《石油钻探技术》编辑部与中国知网签订了“中文精品学术期刊外文版数字出版合作协议”,标志着该刊正式加入“中文精品学术期刊外文版数字出版工程”,以后该刊的优秀论文将以英文形式走向国际。

“中文精品学术期刊外文版数字出版工程”由中国知网首创提出,并由国家新闻出版广电总局批准,旨在以全新的数字出版与传播模式,自主打造一批具有较强国际影响力的双语中国学术期刊。具体而言,该工程以中外文双语全文对照为基本出版模式,建立学术创新点与知识点数据库,并与数字化文献相链接,通过中国知网的国际销售渠道向全世界销售,从而使我国最新学术成果能够同时向国内外学术界、教育界和社会公众三个层面的读者进行广泛传播。这对中国科技期刊“走出去”、将中国学术推向世界具有重要的推动作用。

打造“具有国际影响力的中国杰出学术期刊”是《石油钻探技术》的最终发展目标,而不断提高国际知名度与影响力是实现这一目标的关键。加入“中文精品学术期刊外文版数字出版工程”后,编辑部会精选《石油钻探技术》发表的优秀论文,将其全文翻译成英文,然后借助该工程的数字化出版平台和广泛的国际销售渠道,让其更好、更快地迈向国际舞台,更好地在国际学者面前展示我国石油工程技术的发展与进步,真正实现《石油钻探技术》“走出去”的目标,全面提升其在国际石油工程界的知名度与影响力,从而促进其实现最终的发展目标。

[供稿　陈会年]