

裂缝性低渗透油藏 注水吞吐开发影响因素分析

杨 凯^{1,2}

(1. 西南石油大学, 四川 成都 610500, 2. 中油西南油气田分公司, 重庆 405400)

摘要:大量实验证明, 裂缝具有较强的压敏效应。低渗基质中存在启动压力梯度, 使得裂缝性低渗透油藏的开发非常困难, 而注水吞吐对保持油层压力以及实现稳产具有明显优势。建立一个比较完整的裂缝性低渗透油藏渗流模型, 运用数值模拟方法, 利用所编制的数值模拟程序, 分析计算了启动压力梯度和应力敏感对该类油藏注水吞吐开发的影响。研究结果表明: 启动压力梯度对产量的影响在生产后期, 启动压力梯度越大, 对油井产量的影响也越大; 应力敏感在整个生产过程中均影响产量, 随着其值的增加, 油井产量降低, 当应力敏感系数增大到一定值后, 产量的降低幅度几乎不会发生变化。

关键词:裂缝性低渗透油藏; 注水吞吐; 启动压力梯度; 应力敏感; 数值模拟

中图分类号: TE344 **文献标识码:** A

引言

对于裂缝性低渗透油藏, 传统的衰竭式开采过后, 基岩中将残余大量的原油, 常规注水开发可以降低部分残余油量, 但油井见水快, 含水率上升快, 易发生水窜或暴性水淹现象。针对这些问题, 国内一些油田提出采用原井注水适当补充油层能量后反吐采油的方式, 在保持油层压力的前提下, 实现油田的相对稳产。其中, 头台油田、安乐油田、江汉王厂油田、中原马厂油田、中原 A463 油藏进行注水吞吐后取得了比较明显的效果^[1-2]。

石油工业中广泛应用双重孔隙来描述裂缝性油藏, Kazemi 和 Rossen 等人最先开始裂缝性油气藏数值模拟研究^[3-4], 随后 Thomas、J. R. Gilman 等人分别提出各自的双孔隙度模型。华北油田的王瑞河发表了双重介质拟四组分模型^[5]; 尹定公布了自己研制的全隐式裂缝性三维三相裂缝模型; 中国石油勘探开发研究院袁士义、冉启全等人建立将裂缝变形与基质渗吸作用集为一体的变形双重介质油藏数值模拟模型^[6]。从以上调研可以看出: 国内外针对裂缝性油藏的常规双重介质油藏数值

模拟技术已得到一定规模的发展和应用, 但是由于裂缝性低渗透油藏致密基质中存在启动压力梯度, 裂缝具有应力敏感特征, 采用常规双重介质油藏数值模拟计算裂缝性低渗透油藏的开发效果, 其结果常常与生产实际存在较大的误差。因此首次提出考虑油藏裂缝应力敏感及低渗透基质启动压力梯度的裂缝性低渗透油藏数值模拟研究。

1 数学模型的建立

1.1 考虑启动压力梯度的基质系统流体运动方程

裂缝性低渗透油藏注水开发的过程中, 流体必须经历从裂缝向基质的流动过程, 需要克服一个启动压力, 即流体在基质中的流动不再服从达西定律。根据油气渗流的非达西定律, 考虑启动压力梯度的流体运动方程为:

$$\begin{cases} v_l = -\frac{K_m K_{r_l}}{\mu_l} (\nabla p_m - \gamma_l \nabla D - G_l), \nabla p_m - \gamma_l \nabla D > G_l \\ v_l = 0, \nabla p_m - \gamma_l \nabla D \leq G_l \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_l 为 l 相的渗流速度, m/h; p_m 为基质系统中

的压力,MPa; K_{rl} 为基质系统中 l 相的相对渗透率; K_m 为裂缝系统的渗透率, μm^2 ; μ_l 为 l 相的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; G_l 为 l 相的启动压力梯度,MPa/m。 γ_l 为流体的重率,MPa; D 为深度,m;下标 l 代表o、g、w。

1.2 考虑应力敏感的裂缝系统流体运动方程

作为裂缝性低渗透油藏储渗空间的裂缝具有较大的变形空间,且容易发生形变,裂缝的宽度受上覆岩层所产生的净压力控制,即裂缝对应力敏感。当净压力增大时,裂缝趋向闭合;当净压力减小时,裂缝趋向张开,导致裂缝的渗透率随净压力变化而改变。建立裂缝性低渗透油藏的数学模型时,应该考虑裂缝应力敏感效应的影响。许多学者对实验数据进行非线性回归后发现,裂缝渗透率与有效应力的关系满足关系式^[7]:

$$K_f = K_{fi} \exp[-\beta(\sigma_t - p_f)] \quad (2)$$

将式(2)代入流体运动的达西定律,便得到裂缝中考虑应力敏感的流体运动方程:

$$v_l = -\frac{K_{fi}}{\mu_l} \exp[-\beta(\sigma_t - p_f)] (\nabla p_f - \gamma_l \nabla D) \quad (3)$$

式中: p_f 为裂缝系统中的压力,MPa; K_{fi} 为裂缝系统中 l 相的相对渗透率; K_{fi} 为裂缝系统的初始渗透率, μm^2 ; K_f 为裂缝系统的渗透率, μm^2 ; β 为应力敏感系数, MPa^{-1} ; σ_t 为上覆岩石压力,MPa。

1.3 考虑渗吸的裂缝性低渗透油藏基质裂缝交换方程

对于大多数裂缝性低渗透油藏来说,最主要的驱动力是流体膨胀和渗吸。因此,如果基质裂缝交换方程有效地考虑了流体膨胀和渗吸,就能够准确地模拟裂缝性油藏开采动态。基质裂缝交换方程为:

$$\Gamma_{wmt} = V\rho_w \lambda_w \sigma_p (\bar{p}_{wm} - p_{wf}) - V\phi \rho_w \sigma_s (\bar{S}_w - S_{wi}) \quad (4)$$

$$\text{其中: } \sigma_p = \frac{\pi^2}{L^2}, \sigma_s = \left(\frac{8}{\pi^2} + 1 \right) \frac{D(t)}{2 \int_0^t D(\tau) d\tau} = bt^{-1}.$$

式中: Γ_{wmt} 为基质与裂缝间流体交换量,kg/s; V 为基质块体积, m^3 ; ρ 为密度,kg/ m^3 ; λ 为流度, $\mu\text{m}^2/\text{mPa}\cdot\text{s}$; σ_p 为压力扩散形状因子; σ_s 为饱和度扩散形状因子; L 为裂缝的长度,m; $D(t)$ 为扩散系数; S_w 为含水饱和度; S_{wi} 为束缚水饱和度; b 为常数。

1.4 数学模型

按组分考虑物质守恒关系,可以得到裂缝和孔隙内油、气、水相组分物质守恒方程,进一步可以得到裂缝性低渗透油藏的三维三相渗流微分方程组。该方程组由裂缝系统的3个方程和基岩系统的3个方程组成,其形式如式(5)所示:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \left(\frac{K_{ro} K}{\mu_o B_o} \nabla \Phi_o \right) + q_o - \tau_o = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_o}{B_o} \right) \\ \nabla \cdot \left(\frac{K_{rw} K}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right) + q_w - \tau_w = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w}{B_w} \right) \\ \nabla \cdot \left[\frac{K_{rg} K}{\mu_g B_g} \nabla \Phi_g + R_{so} \frac{K_{ro} K}{\mu_o B_o} \nabla \Phi_o + R_{sw} \frac{K_{rw} K}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right] + q_g - \tau_g = \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_g}{B_g} + R_{so} \frac{S_o}{B_o} + R_{sw} \frac{S_w}{B_w} \right) \right] \\ \nabla \cdot \left[\frac{K_{rof}}{\mu_{of} B_{of}} K_{fi} \exp[-\beta(\sigma_t - p_{of})] \nabla \Phi_{of} \right] + q_{of} + \tau_o = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi_f \frac{S_{of}}{B_{of}} \right) \\ \nabla \cdot \left[\frac{K_{rwf}}{\mu_{wf} B_{wf}} K_{fi} \exp[-\beta(\sigma_t - p_{of})] \nabla \Phi_{wf} \right] + q_{wf} + \tau_w = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi_f \frac{S_{wf}}{B_{wf}} \right) \\ \nabla \cdot \left\{ K_{fi} \exp[-\beta(\sigma_t - p_{of})] \left(\frac{K_{rgf}}{\mu_{gf} B_{gf}} \nabla \Phi_{gf} + R_{sof} \frac{K_{rof}}{\mu_{of} B_{of}} \nabla \Phi_{of} + R_{swf} \frac{K_{rwf}}{\mu_{wf} B_{wf}} \nabla \Phi_{wf} \right) \right\} + q_{gf} + \tau_g \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi_f \left(\frac{S_{gf}}{B_{gf}} + R_{sof} \frac{S_{of}}{B_{of}} + R_{swf} \frac{S_{wf}}{B_{wf}} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\tau_w = \Gamma_{wmt}/\rho_w$

式中: Φ 为势,MPa; q_w 、 q_g 、 q_o 为源汇项产量, m^3/s ;

τ_w 、 τ_w 、 τ_w 为基质与裂缝间流体单位体积交换量,

m^3/s ; R_{so} 为气油比; R_{sw} 为气水比; B 为体积系数;下

角标 f 代表裂缝,不使用 f 的参数为基质系统的参数,第 1 个注释表示流体的相。

以上建立的数学模型通过线性化处理,可以分别得到计算基质压力和裂缝压力的线性方程,对 2 个压力方程进行求解后,就可以解决裂缝性低渗透油藏数值模拟的问题。

2 实例计算

结合考虑启动压力梯度和应力敏感的裂缝性低渗透油藏数学模型和数值模型,对已有的 Boast-NFR 模拟器进行修改,形成考虑渗吸的裂缝性油藏注水开发数值模拟器。对该模拟器进行零流量监测结果表明:从模拟开始到结束,油藏各节点压力与饱和度值均保持不变,说明该模型的零平衡检验符合要求。

选取基质系统、裂缝系统孔隙度分别为 0.29、0.01,渗透率分别为 0.1×10^{-3} 、 $90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原始油藏压力为 34.5 MPa,PVT 参数见表 1、2。应用以上数据分析启动压力梯度和应力敏感对注水吞吐开发裂缝性低渗透油藏的效果进行简单分析。

表 1 油 PVT 参数

p/MPa	$\mu_o/\text{mPa} \cdot \text{s}$	B_o	R_{so}
0.10143	5.52	1.000	0.0000
17.0016	4.27	1.233	71.7775
34.5966	4.11	1.381	135.3621
41.4966	4.51	1.371	—

表 2 气 PVT 参数

p/MPa	μ_g	B_g
0.10143	0.0138	0.15558
34.5966	0.0262	0.00390

2.1 启动压力梯度对注水吞吐开发效果的影响

保持基本参数不变,模拟计算油相启动压力梯度为 $1.5 \times 10^{-4} \text{MPa/m}$ 时的情况,计算结果与不考虑启动压力梯度时的结果进行对比(图 1、2)。

由图 1、2 可以看出,启动压力梯度的存在使注水吞吐效果变差,主要表现在单井日产油量的降低。观察日产油量曲线可以发现,在油井衰竭开采期间,启动压力梯度的影响很小,至注水后开井吐油阶段,油井产量明显下降。主要原因是:吐油阶段,基质中的油流至井底需要克服启动压力梯度,同时基质中的油在渗吸到裂缝中的过程中也需要克服启动压力梯度。这样,在同样压差下考虑启动压力梯度时的产量就要小于不考虑启动压力梯度的情

况,并且启动压力梯度的作用在油井开发后期表现更为明显,主要是在后期启动压力梯度不仅使基质流到井筒的阻力变大,同时还使基质到裂缝的渗吸量减小,在双重作用的影响下油井的产量下降,采收率降低。

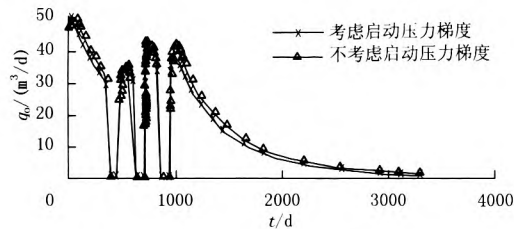


图 1 启动压力梯度对注水吞吐日产油量的影响

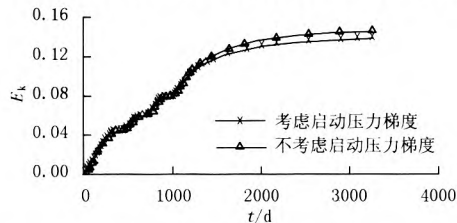


图 2 启动压力梯度对注水吞吐采收率的影响

2.2 应力敏感对注水吞吐开发效果的影响

保持基本参数不变,模拟计算裂缝应力敏感系数为 0.02MPa^{-1} 时的结果,并与不考虑裂缝应力敏感时的结果进行对比(图 3、4)。

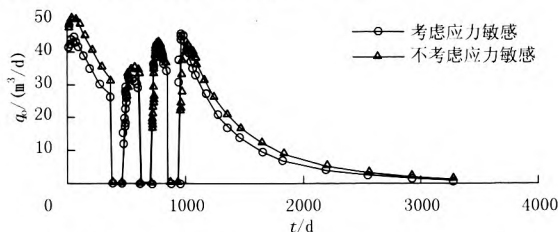


图 3 应力敏感对注水吞吐日产油量的影响

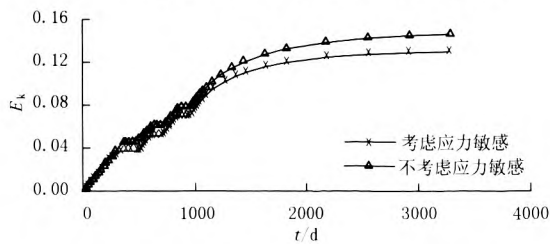


图 4 应力敏感对注水吞吐日产油量的影响

由图 3、4 可以看出,裂缝的应力敏感使注水吞吐效果变差,并且效果明显。从日产油量曲线可以看到,油井一开始生产便受到应力敏感作用的影响,日产油低于不考虑应力敏感的情况。主要原因是:由于流体的开采使得裂缝受到(下转第 91 页)

(上接第84页)的净围压增大,随着生产的进行裂缝宽度减小,裂缝的渗透率降低,流体流动不会像原来一样流畅。在注水以后,地层的压力得到恢复,但是裂缝的变形很多是塑性变形,裂缝渗透率随注入水量的增加并未得到明显的改善,表现在吐油期间油井的日产油量还是低于没有应力敏感的情况。

3 结 论

(1) 建立裂缝性低渗透油藏渗流数学模型,考虑了低渗透基质的启动压力梯度和裂缝的应力敏感问题,对裂缝性低渗透油藏的模拟有较好的针对性和适应性。

(2) 应用编制的裂缝性低渗透油藏数值模拟程序,分析了启动压力梯度和应力敏感对裂缝性低渗透油藏开发影响的结果。

参考文献:

[1] 王鹏志. 注水吞吐开发低渗透裂缝油藏探讨[J]. 特

种油气藏,2006,13(2):46-47.

[2] 黄大志,向丹. 注水吞吐采油机理研究[J]. 油气地质与采收率,2004,11(5):39-43.

[3] Kazemi, Numerical H. Simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs[J]. SPET, 1976(6):317-326.

[4] Rossen K H. Simulation of naturally fractured reservoir with semi-implicit source terms[J]. SPET, 1977, (6): 201.

[5] 王瑞河. 双重介质拟组分模型[J]. 石油学报,1991, 12(3):3.

[6] 袁士义,冉启全,等. 考虑裂缝变形的低渗透双重介质油藏数值模拟研究[J]. 自然科学进展,2005,15(1): 77-83.

[7] 蒋海军. 裂缝性储层应力敏感性实验研究[J]. 石油钻探技术,2000,28(6):32-33.

审稿专家 尹洪军

编辑 姜 岭