

启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流及开发生态的影响

赵益忠¹,程远方²,刘钰川²,孙德旭¹,杜鹏¹

(1.中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院,山东东营 257000;

2.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266555)

摘要:基于广义达西定律,考虑启动压力梯度影响,建立了渗透率各向异性低渗透油水两相渗流模型,并基于虚位移原理开发了有限元程序,以大庆油区苏仁诺尔油田苏301断块矩形五点线性注采井网为例,分析了启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流和宏观开发生态的影响。结果表明:受启动压力梯度的影响,低渗透油藏内渗流速度变化存在显著的延迟效应,渗流速度呈阶梯状变化;启动压力梯度越小,油井初期产油量越高,但后期含水率上升速度越快,油井后期产油量降低幅度越显著;启动压力梯度越大,油藏采出程度越低,且随着生产时间增长,对采出程度影响越显著。

关键词:启动压力梯度 低渗透油藏 有限元 微观渗流 开发生态

中图分类号: TE348

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)01-0067-03

近年来,大庆、胜利等油区新增储量中低渗透油藏所占比例越来越大,该类油藏渗透率低,渗流阻力大,油藏存在启动压力梯度,渗流规律不符合线性达西定律^[1-4],并且由于低渗透储层发育微裂隙,使得该类储层普遍具有较强的渗透率各向异性。目前,诸多学者在低渗透油藏水平井渗流、整体压裂等领域也进行了研究^[5-8],所建渗流模型仍主要采用差分法求解^[9-10],在分析储层渗透率各向异性、非均质性和启动压力梯度等多因素影响时具有一定局限性。为此,基于广义达西定律,建立了考虑启动压力梯度的油水两相渗流数学模型,并开发了相应有限元程序,结合大庆油区苏301断块开发实际,对低渗透油藏微观渗流规律和宏观开发生态进行了模拟分析,以期对低渗透油藏开发实践提供理论依据。

1 考虑启动压力梯度的渗透率各向异性渗流模型

建立渗流模型前,假设条件如下:①油藏渗流为油水两相渗流;②油藏渗流为等温渗流,且无相间传质;③油藏具有渗透率各向异性和非均质性;

④考虑启动压力梯度;⑤考虑毛管压力影响;⑥油藏流体可微压缩,且压缩系数保持不变。

建立的考虑启动压力梯度的渗透率各向异性油水两相渗流油相压力方程为

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot \left[\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} \mathbf{K} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} \right) \nabla p_o \right] = \\ & \frac{q_o}{\rho_o} + \frac{q_w}{\rho_w} + C_w \phi S_w p_c' \frac{\partial S_w}{\partial t} - (C_o S_o + C_w S_w) \phi \frac{\partial p_o}{\partial t} + \\ & \nabla \cdot \left[\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} \mathbf{K} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} \right) \rho_o g \right] - \nabla \cdot \left(\frac{K_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} \nabla p_c \right) - \\ & \nabla \cdot \left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} \mathbf{K} \mathbf{G}_o \right) - \nabla \cdot \left(\frac{K_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} \mathbf{G}_w \right) \quad (1) \end{aligned}$$

式中: K_{ro} 为油相相对渗透率; μ_o 为地层原油粘度, Pa·s; \mathbf{K} 为渗透率张量,对于二维问题有4个分量,对于三维问题有9个分量, m^2 ; K_{rw} 为水相相对渗透率; μ_w 为地层水粘度, Pa·s; p_o 为油相压力, Pa; q_o 为油相源汇项; ρ_o 为地层原油密度, kg/m^3 ; q_w 为水相源汇项; ρ_w 为地层水密度, kg/m^3 ; C_w 为水相压缩系数, Pa^{-1} ; ϕ 为孔隙度; S_w 为含水饱和度; p_c 为毛管压力, Pa; t 为时间, s; C_o 为水相压缩系数, Pa^{-1} ; S_o 为含油饱和度; g 为重力加速度, m/s^2 ; \mathbf{G}_o

收稿日期:2012-11-26。

作者简介:赵益忠,男,工程师,博士,从事防砂工艺技术与基础理论研究。联系电话:15266197230, E-mail: yizhong_zhao@126.com。

基金项目:山东省博士后创新项目“疏松砂岩储层应力及出砂界限研究”(201203017)。

为油相启动压力梯度, Pa/m; \mathbf{G}_w 为水相启动压力梯度, Pa/m。

含水饱和度方程为

$$C_w \phi \frac{\partial p_o}{\partial t} S_w + (\phi - C_w \phi S_w p_c') \frac{\partial S_w}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{K_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} p_c' \nabla S_w \right) = \frac{q_w}{\rho_w} + \nabla \cdot \left[\frac{K_{rw}}{\mu_w} \mathbf{K} (\nabla p_o + \rho_o g - \mathbf{G}_w) \right] \quad (2)$$

当建模整体坐标系与储层渗透率局部坐标系之间存在夹角时,须将局部坐标系下渗透率分量转换到整体坐标系下计算。对于二维问题,假设整体坐标系与局部坐标系下渗透率主轴之间夹角为 θ , 则整体坐标系下渗透率张量的各分量与局部坐标系下渗透率主轴分量的关系为

$$\begin{bmatrix} K_{xx} \\ K_{yy} \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(360-\theta) & \sin^2(360-\theta) \\ \sin^2(360-\theta) & \cos^2(360-\theta) \\ -\frac{1}{2}\sin 2(360-\theta) & \frac{1}{2}\sin 2(360-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: K_{xx} , K_{yy} 和 K_{xy} 分别为整体坐标系下 x 方向渗透率、 y 方向渗透率和渗透率张量正交分量, m^2 ; x 和 y 分别为整体坐标系下水平和垂直方向; K_1 和 K_2 分别为局部坐标系下渗透率张量的2个主轴分量, m^2 。

利用虚位移原理,在对油、水相渗流方程弱化的基础上,开发了渗透率各向异性低渗透油藏油水两相渗流有限元程序。采用IMPES方法设计整体流程,压力场及饱和度方程均采用非线性抛物算法,求解器采用不完全LU分解预条件子共轭梯度法,流速场采用最小二乘法求解。

2 启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流的影响

采用一注一采物理模型(注水井与采油井相距50 m)分析启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流的影响,为确保计算精度,在注采井周边均进行了网格加密^[5]。

在注水井与采油井连线的延长线上、距采油井15 m处,假设存在A点,模拟生产10 d后不同启动压力梯度影响下A点的渗流速度。结果(图1)表明:①当启动压力梯度为0时,与常规油水两相模型计算结果完全吻合,从侧面验证了所研发低渗透油水两相有限元程序的准确性;②当存在启动压力梯度时,A点的渗流速度变化存在延迟效应,且启动压力

梯度越大,延迟效应越明显,当启动压力梯度为0.10 MPa/m时,生产1.4 d后,A点的渗流速度才开始逐渐增大,说明启动压力梯度会显著影响油、水相的微观渗流;③当启动压力梯度较大时,渗流速度开始呈现阶梯状变化,且启动压力梯度越大,该趋势越明显。这是因为:当油藏启动压力梯度较大时,启动压力梯度会对油、水相渗流前缘产生一定的抑制作用,在驱替压力梯度突破启动压力梯度前,渗流速度略有变化,而当驱替压力梯度突破启动压力梯度时,渗流前缘积聚的压力在短时间内得以释放,导致渗流速度明显增大。

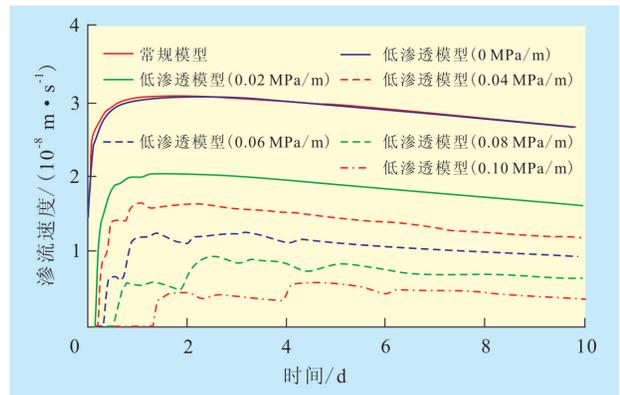


图1 启动压力梯度对油藏渗流速度的影响

模拟生产10 d后,分析注水井及采油井连线上的压力分布(图2)可知:启动压力梯度越大,采油井近井区域压降消耗越大,注水和采油引起的油藏内压力变化影响范围越小,因为启动压力梯度的存在会在一定程度上限制油、水相驱替前缘的扩展,启动压力梯度越大,注采驱替压力体系作用面积越小。

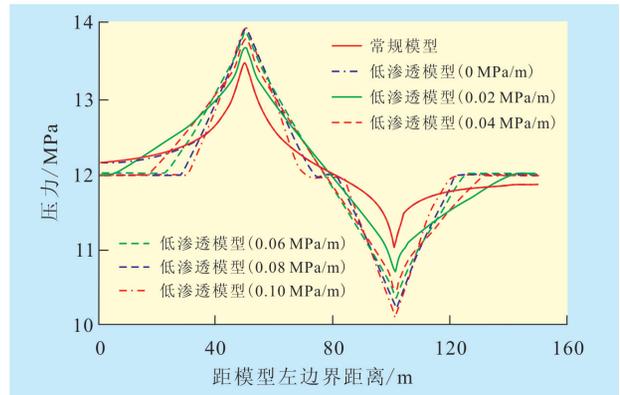


图2 启动压力梯度对油藏压力传导的影响

3 启动压力梯度对低渗透油藏开发动态的影响

以大庆油区苏仁诺尔油田苏301断块为例,分

析启动压力梯度对低渗透油藏矩形井网压裂开发动态的影响。该断块为典型低渗透油藏,其油层段空气渗透率均小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其动用地质储量为 $100.58 \times 10^4 \text{ t}$,采用矩形五点线性注采井网开发。

根据苏301断块开发数据,模拟时设定人工裂缝长度为90 m,井网为 $300 \text{ m} \times 150 \text{ m}$,分析了启动压力梯度分别为0,0.01,0.03,0.05和0.07 MPa/m时的生产动态。结果(图3)表明:①开发初期,油藏启动压力梯度越小,油井产油量越高,这是因为启动压力梯度越小,水驱前缘的注采压力体系越容易突破油藏自身的启动压力梯度,注采体系间压力传导更为流畅,使得油井压裂后产油量越高;②开发后期,产油量差异逐渐缩小,且启动压力梯度越大,产油量越高,这是因为启动压力梯度越小,油井见水越快,含水率上升越快,导致产油量降低幅度越明显。

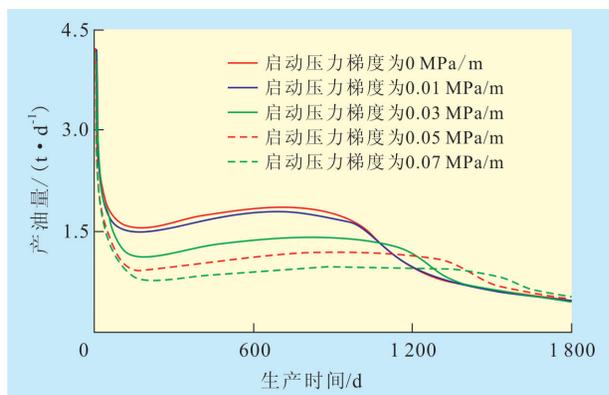


图3 启动压力梯度对产油量的影响

由不同启动压力梯度影响下的油井含水率(图4)可知:①在生产初期,油井含水率略有上升,随后趋于稳定,但生产一段时间后,油井含水率开始迅速上升,且启动压力梯度越小,油井含水率上升速度越快,此时注水前缘已推进至油井周边,对油井生产产生显著影响;②当启动压力梯度为0,0.01,0.03,0.05和0.07 MPa/m时,对应注水前缘推进至油

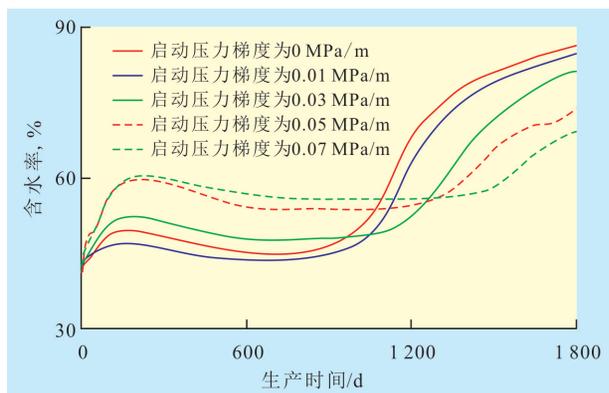


图4 启动压力梯度对油井含水率的影响

井的时间分别为950,1 000,1 150,1 300和1 450 d。

分析不同启动压力梯度下的油藏采出程度(图5)发现:①启动压力梯度越大,油藏采出程度越低,因为对于低渗透油藏,油水两相流动时首先要克服油藏本身的启动压力梯度,导致在同样的驱替压力下油、水相渗流速度降低,使得油藏采出程度降低^[8-9];②开发初期,启动压力梯度对油藏采出程度影响相对较小,随着开发时间的延长,启动压力梯度对油藏采出程度影响逐渐增大。当启动压力梯度为0,0.01,0.03,0.05和0.07 MPa/m时,生产5 a后油藏采出程度分别为13.1%,12.6%,11.4%,10.4%和9.1%,即启动压力梯度每增加0.01 MPa/m,油藏采出程度相应会降低约0.55%。

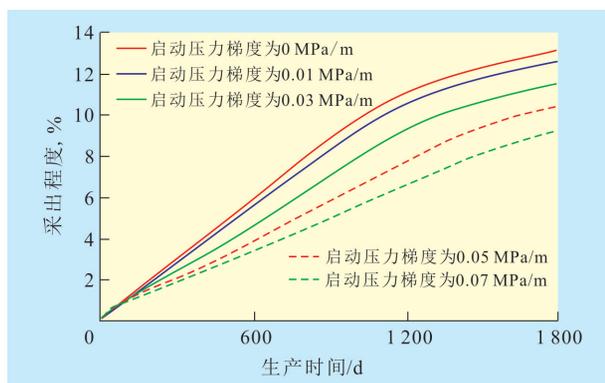


图5 启动压力梯度对采出程度的影响

综上所述,启动压力梯度是影响低渗透油藏微观渗流和宏观开发动态的重要影响因素,在进行低渗透区块整体压裂开发时应重点考虑。

4 结论

基于广义达西定律,考虑启动压力梯度影响,建立了渗透率各向异性低渗透油水两相渗流模型,并基于虚位移原理开发了有限元程序。受启动压力梯度影响,低渗透油藏内渗流速度变化存在明显的延迟效应,渗流速度呈阶梯状变化,且会显著影响油藏内压力传导范围。

启动压力梯度越小,油井初期产油量越高,但后期含水率上升越快,导致油井后期产油量降幅越显著。启动压力梯度越大,油井见水时间越长,油藏采出程度越低,对于苏301断块 $300 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 矩形五点线性注采井网,当启动压力梯度由0.01增至0.07 MPa/m时,每增加0.01 MPa/m,见水时间推迟约为75 d,生产5 a后油藏采出程度约降低0.55%。

(下转第73页)