

低渗透油藏注采井间压力分布与流态响应研究

燕良东¹, 朱维耀², 宋洪庆²

(1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用非线性数学模型, 能够全程描述低渗透油藏的非线性流动规律, 从理论上给出了低渗透油藏中流态分布的计算方法, 分析了注采压差、注采井距和地层渗透率对流态分布的影响, 指出了流体在低渗透油藏中以特低速度流动时压力分布的特点, 纠正了前人在这个问题上的认识失误。实际岩芯的渗流试验检验了理论的正确性。

关 键 词: 低渗透; 非线性数学模型; 流态; 影响因素; 压力分布

中图分类号: O 357

文献标识码: A

Study of pressure distribution and flow pattern response between injection and production well in low permeability reservoirs

YANG Liang-dong¹, ZHU Wei-yao², SONG Hong-qing²

(1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China;

2. School of Civil and Environment Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The nonlinear flowing rule in low permeability reservoirs can be described entirely with the nonlinear mathematical model. The theoretical calculation method of flow pattern distribution is proposed. Flow pattern distribution under the influence of injection-production pressure, injection-production well spacing and formation permeability in low permeability reservoirs is analyzed in this paper. The model proposed here also describes the pressure distribution characteristics of fluid flow in extra-low velocity in low permeability reservoirs, which corrects former misunderstandings of the characteristics.

Key words: low permeability; nonlinear mathematical model; flow pattern; influence factors; pressure distribution

1 引 言

低渗透油藏与常规渗透率油藏的渗流规律不同, 它在较低压力梯度下存在一个明显的非线性渗流阶段, 这个非线性流动段对油藏中各点的流态分布和开发指标的计算具有重要影响。目前, 一些研究者以经验公式为基础, 利用视流度与驱替压力梯度的关系, 对低渗透油藏中的流态分布进行了研究, 但尚缺乏理论支撑^[1]。本文以描述低渗透油藏渗流规律的连续数学模型为基础, 系统分析了低渗透油藏中注采井间压力的分布规律及流态响应和影响流态分布的因素。

2 低渗透非线性渗流数学模型

典型的低渗透渗流规律如图 1 所示, 其渗流速

度与压力梯度关系如下:

$$OA \text{ 段: } V = 0 \quad \nabla P < G_a \quad (1)$$

$$AD \text{ 段: } V = \frac{K}{\mu} (\nabla P - G_a)^{n_d} \quad G_a \leq \nabla P \leq G_b \quad (2)$$

$$DE \text{ 段: } V = \frac{K}{\mu} (\nabla P - G_c) \quad \nabla P > G_b \quad (3)$$

式中: K 为绝对渗透率 (m^2); μ 为黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$); V 为渗流速度 (m/s); ∇P 为驱动压力梯度 (Pa/m); G_a 为真实启动压力梯度 (Pa/m); G_b 为临界压力梯度 (Pa/m); G_c 为拟启动压力梯度 (Pa/m); n_d 为方程参数。

典型的低渗透渗流规律如下: 存在压力梯度 ∇P 大于真实启动压力梯度 G_a 的运动区和小于 G_a 的静止区; 在真实启动压力梯度 G_a 和临界压力梯度 G_b 间, 渗流速度与压力梯度呈非线性关系; 只有压

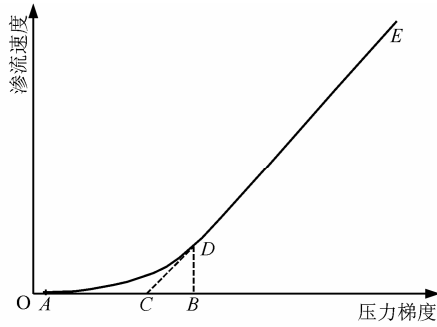


图1 低渗透油层流动规律

Fig.1 Flowing rule in low permeability reservoirs

力梯度 ∇P 大于临界压力梯度 G_b 以后, 渗流速度与压力梯度才呈现线性达西规律。

目前描述低渗透油层流动规律的数学模型大多为考虑拟启动压力梯度的拟线性模型。该模型将非线性流动简化为线性流动, 不能对低速流动阶段做出正确描述, 从而不能在理论上正确分析流态分布。邓英尔提出的三参数模型用一个表达式表述了低渗透油层的全部流动规律, 物理意义明确, 适用于确定油层中的流动状态^[2]。邓英尔提出的模型如下:

$$v \left(a_1 + \frac{a_2}{1 + bv} \right) = \nabla P \quad (4)$$

式中: a_1 , a_2 , b 分别为由试验确定的参数, 其单位分别为 $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, s/m (即参数 a_1 , a_2 , b 分别是流度的倒数、速度的倒数)。该式表示渗流过程中岩石固体和渗流流体相互作用不可忽略时的力学规律, 为二项式非线性渗流模型。其物理意义为: 流体渗流阻力由两部分组成, 第1部分为黏性阻力, 它与渗流速度的一次方成正比; 第2部分为岩石固体与渗流液体相互作用阻力。当岩石固体与流体相互作用可忽略时, 则式(4)变成线性渗流模型^[2]。

当渗流速度较小时, 岩石固体与流体的相互作用不可忽略, 此时呈现非线性渗流规律; 当渗流速度较大时, 黏性阻力的作用远大于岩石固体与流体的相互作用, 流动呈现线性达西流动的特点。

对于非线性模型式(4)中的参数可根据低渗透渗流试验结果运用数值逼近的方法编程求得^[3]。当渗透率越低时, a_1 , a_2 , b 的值越大, 说明储层的渗透率越低, 其黏性阻力越大, 岩石固体与渗流液体相互作用的阻力同样越大, 非线性作用越强。

3 压力及压力梯度分布

由三参数模型的单井平面径向稳定流压力公式可得等产量一源一汇注采井间稳定流动的压力公式

为

$$P = P_{\text{wif}} - \frac{a_1 Bq}{2\pi h} \ln \frac{(L - r_w)r}{r_w(L - r)} - \frac{a_2 Bq}{2\pi h} \ln \left[\frac{2\pi h(L - r_w) + bBq}{2\pi h r_w + bBq} \frac{2\pi h r + bBq}{2\pi h(L - r) + bBq} \right] \quad (5)$$

式中: P 为压力 (Pa); B 为体积系数; q 为流量 (m^3/s); P_{wif} 为水井井底流压 (Pa); r_w 为井半径 (m); r 为距水井的距离 (m); L 为注采井距 (m)。

而考虑拟启动压力梯度的线性非达西模型等产量一源一汇注采井间稳定流动的压力公式为

$$P = P_{\text{wif}} - \frac{\mu Bq}{2\pi K h} \ln \frac{(L - r_w)r}{r_w(L - r)} - G_c(r - 2r_w) \quad (6)$$

对式(6)求导, 得3参数模型等产量一源一汇注采井间稳定流动的压力梯度公式为

$$\frac{dP}{dr} = \frac{a_1 Bq}{2\pi h} \frac{L}{r(L - r)} + \frac{a_2 Bq}{2\pi h r + bBq} \frac{2\pi h L + 2bBq}{bBq + 2\pi h(L - r)} \quad (7)$$

显而易见, 当地层中某点的压力梯度值大于临界压力梯度时, 该点的渗流为线性渗流, 否则为非线性渗流。

拟线性流动时等产量一源一汇注采井间稳定流动的压力梯度公式为

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\mu Bq}{2\pi K h} \frac{L}{r(L - r)} \quad (8)$$

4 计算分析

4.1 确定流态的步骤

要确定某一低渗透率的地层中线性流动和非线性流动的范围, 需要采取以下步骤: (1) 根据岩芯单相流动试验数据, 绘制流速 v 与压力梯度 ∇P 的曲线, 运用数值逼近方法确定该储层该渗透率下3参数模型的3个参数 a_1 , a_2 , b 的值; (2) 根据岩芯单相流动试验数据确定线性流动和非线性流动的临界压力梯度 G_b ; (3) 求出地层中距井不同距离处的压力梯度; (4) 根据临界压力梯度 G_b 值, 确定线性流动的范围。

对于3种典型的低渗透储层 (一般低渗透、特低渗透、超低渗透), 取体积系数 $B = 1.08$, 黏度 $\mu = 6.74 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 根据试验得到的参数及临界压力梯度如表1所示。

表 1 非线性渗流规律基本参数
Table 1 Basic parameters of nonlinear flowing rule

储层 类别	渗透率 K / 10^{-15} m^2	a_1 / $10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	a_2 / $10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	b / $10^6 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	临界压 力梯度 / $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$
超低渗透	0.25	26.96	932	2280	0.95
特低渗透	5	1.348	3.94	44.53	0.45
一般低渗	10	0.674	1.9	28.94	0.35

4.2 流态分布的影响因素

油田开发时, 注采井间压力梯度值是否大于临界压力梯度决定了注采井间的流态分布。决定井间压力梯度值的主要因素是: 压差、井距和渗透率。一源一汇注采井间压力梯度的典型分布如图 2 所示, 图 3 为其局部放大图。

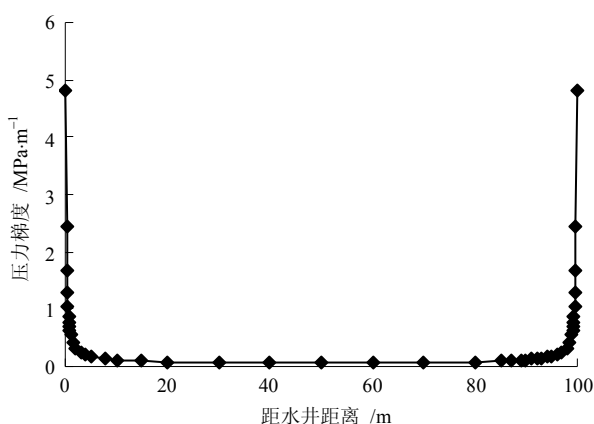


图 2 注采井间压力梯度的典型分布

Fig.2 Typical pressure gradient distribution between injection and production well

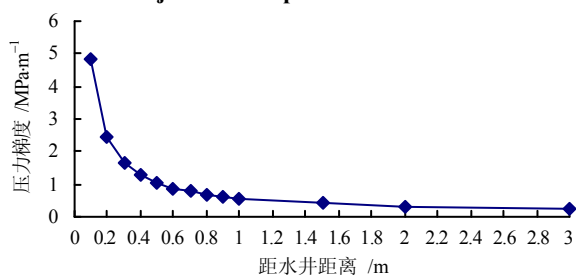


图 3 水井附近压力梯度的分布

Fig.3 Pressure gradient distribution near injection well

(1) 注采井间的流压压差对线性流动范围的影响

当渗透率 $K=5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 考虑真实启动压力梯度和生产实际情况, 取 100 m 注采井距, 流压压差分别为 12, 18, 25 MPa, 体积系数为 1.08, 黏度 $\mu = 6.74 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 水井流压为 30 MPa, 井半径为 0.1 m, 储层厚度为 1 m。由计算结果可见, 取油水井流压压差为 12 MPa 时, 距井约 1.35 m 以内的压力梯度大于临界压力梯度 0.45 MPa/m。于是可以认为, 在 $K=5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 100 m 注采井距、12 MPa 流压压差下, 距井 1.35 m 以内为线性流动, 以外的地层中流体流动都是非线性流动。

同理, 在渗透率 $K=5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 100 m 注采井距的情况下流压压差分别为 18 MPa 和 25 MPa 时, 其线性流动范围为 2.3 m 和 3.6 m。可以认为, 在其他条件不变时, 随注采井间流压压差的增加, 线性流动的范围也随之扩大, 计算结果见表 2。

(2) 注采井距对线性流动范围的影响

当渗透率 $K=10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 考虑真实启动压力梯度和生产实际情况, 取 100, 150, 200 m 注采井距, 流压压差 15 MPa, 体积系数为 1.08, 黏度 $\mu = 6.74 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 水井流压为 30 MPa, 井半径为 0.1 m, 厚度为 1 m。由计算结果可见, 取注采井距 100 m 时, 距井约 2.6 m 以内的压力梯度大于临界压力梯度 0.35 MPa/m。于是可以认为, 在 $K=10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 100 m 井距、15 MPa 流压压差下, 距井 2.6 m 以内为线性流动, 以外的地层中流体流动都是非线性流动。

同理, 在渗透率 $K=10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 流压压差 15 MPa 的情况下、注采井距分别为 150 m 和 200 m 时, 其线性流动范围为 2.2 m 和 1.9 m。可以认为, 在其他条件不变时, 增加注采井距会使线性流动范围减小。计算结果见表 2。

(3) 不同渗透率对线性流动范围的影响

当渗透率 $K=0.25 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 考虑真实启动压力梯度和生产实际情况, 取 100 m 注采井距, 40 MPa 流压压差, 体积系数为 1.08, 黏度 $\mu = 6.74 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 水井流压为 45 MPa, 井半径为 0.1 m, 厚度为 1 m。此时距井约 0.75 m 以内的压力梯度大于临界压力梯度 0.95 MPa/m, 可以认为, 在 $K=0.25 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 上述条件下距井 0.75 m 以内为线性流动, 以外的地层中流体流动都是非线性流动。

同理, 在井距、流压压差等条件不变时, 计算得渗透率 $K=5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 线性流动范围为 7 m; 渗透率 $K=10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时, 线性流动范围为 9 m。可以认为, 在其他条件不变时, 渗透率越小, 线性流动范围越小, 计算结果见表 2。

表 2 不同因素对线性流动范围的影响

Table 2 Effects of various factors on linear flowing range

压差 $K=5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, $L=100 \text{ m}$		井距 $K=10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, $\Delta P=15 \text{ MPa}$		渗透率 $L=100 \text{ m}$, $\Delta P=40 \text{ MPa}$	
压差 /MPa	线性流动区 /m	井距 /m	线性流动区 /m	渗透率 / 10^{-15} m^2	线性流动区 /m
12	1.35	100	2.6	0.25	0.75
18	2.3	150	2.2	5	7
25	3.6	200	1.9	10	9

4.3 压力分布

为接近生产实际, 只对一源一汇注采井间的流动状态进行分析, 设油层厚度为 1 m, 渗透率

$K=10 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 注水井井底流压为 25 MPa, 井距 $L=100 \text{ m}$ 。

当两端注采井间压差刚刚可以克服启动压力梯度使流体流动时, 非线性三参数模型和拟线性模型计算的压力分布如图 4 所示。

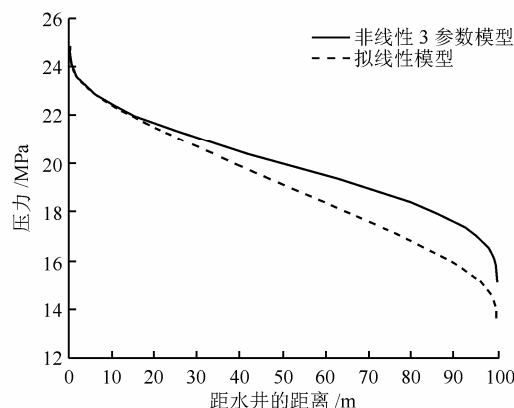


图 4 低速渗流时压力分布的比较

Fig.4 Comparison of pressure distribution in low-speed fluid flow

由图可见, 在低渗透油藏开发中, 流体刚开始时, 其流态绝大部分为非线性流动。流量相同时注采井间真实压力分布要高于拟线性计算的结果, 而不是过去人们所认为的低于拟线性计算的结果。造成这种现象的原因在于流体刚开始流动时, 相同流速下, 非线性模型比拟线性模型更加接近实际情况, 而实际情况则是此时的非线性模型的压力梯度要小于拟线性模型的压力梯度, 见图 1。

当流量持续增加, 流速则增大, 此时其非线性流动范围很小, 整个地层中的大部分流动为线性流动, 在这种条件下, 拟线性模型和非线性模型的计算结果非常接近, 二者计算的压力分布也几乎重合。见图 5。

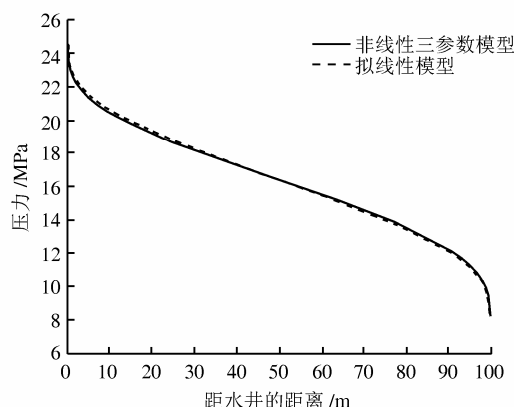


图 5 高速渗流时的压力分布比较

Fig.5 Comparison of pressure distribution in high-speed fluid flow

5 试验验证

取国内某油田的一块岩芯进行渗流规律试验, 该岩芯的空气渗透率为 $0.16 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 为圆柱形, 长度为 0.0492 m , 直径为 0.0249 m , 属超低渗透。试验时首先给岩芯饱和流体, 然后在岩芯两端加以不同压差, 记录不同压差时通过岩芯截面的流量。由试验数据推断, 其拟启动压力为 69.43 MPa, 按拟线性模型计算, 只有试验压力超过该拟启动压力值时流体才能在岩芯中流动, 而实际情况则是压力为 7.12 MPa 时, 流量已经为 $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

由该岩芯试验结果可以推断, 实际油田开发时, 压力梯度不必达到拟启动压力梯度, 流体可以流动, 再考虑到裂缝和微裂缝的作用, 使用拟线性模型将导致很大失误。

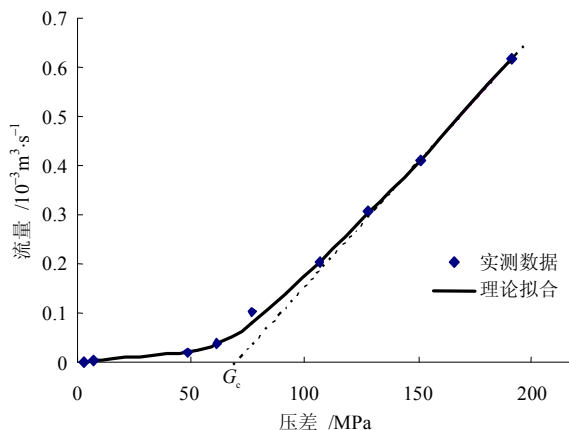


图 6 实测岩芯试验数据与理论拟合曲线

Fig.6 Measured data of core experiment and theoretical fitting curve

6 结 论

(1) 低渗透油藏开发时, 只在油水井附近的小范围内地层中渗流速度较高时, 流体才是线性流动, 而在广大的地层中, 流体的流动都是非线性的, 因此, 在进行渗流计算时, 采用线性达西模型或拟线性模型, 将使计算结果出现较大失误。

(2) 以非线性三参数模型为基础, 提出了一套确定注采井间线性流动范围的计算方法。模拟计算结果表明, 这套方法真实地反映了低渗透油藏的实际流动状况, 与实际吻合。

(3) 渗透率越低, 非线性作用越强, 因而其线性流动范围越小; 注采井间井底流压压差越大, 其流速越大, 则线性流动范围越大; 井距越大, 其平均压力梯度越小, 流速越低, 则线性流动范围越小。

(4) 计算结果表明, 当流体刚刚开始流动时, 相同流量下, 注采井间非线性模型的压差要小于拟线性模型的压差, 而不是通常认为的非线性模型比拟线性模型压差大。

参 考 文 献

- [1] 时佃海. 低渗透砂岩油藏平面径向流流态分布[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33 (4): 491—494.
- [2] 邓英尔, 刘慈群. 低渗油藏非线性渗流规律数学模型及其应用[J]. 石油学报, 2001, 22 (4): 72—77.
- [3] Marquart D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. *JSIAM*, 1963, 11(2): 431—441.
- [4] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- [5] 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29 (2): 86—89.
- [6] Wu Y S. Flow and displacement of Bingham non-Newtonian fluids in porous media[C]. [s.l.]: SPE 20051, 1990. 339—351.
- [7] 阮敏, 何秋轩. 低渗透非达西渗流临界点及临界参数判别法[J]. 西安石油学院学报, 1999, 14 (3): 9—10.
- [8] 李道品, 黄延章, 罗迪强, 等. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.