

特低渗透多层油藏水驱前缘研究

徐庆岩^{1,2}, 杨正明³, 何英³, 于荣泽³, 晏军³

(1.中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007; 2.中国科学院研究生院, 北京 100090;

3.中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

摘要:特低渗透多层油藏在注水开发时由于各储层物性和流体特征存在差异,会引起各储层注水推进速度不同。利用特低渗透油藏渗流理论建立理论模型,推导了多层油藏考虑油相和水相启动压力梯度的水驱前缘计算公式,分析了渗透率级差、注采压差、注采井距、地层原油粘度对注水推进速度的影响。并针对注采井距的影响,首次提出了无因次水驱前缘的概念。研究表明,渗透率级差越大,渗透率相对较小储层的水驱前缘推进越慢;随着注采压差的增大,渗透率相对较小储层的水驱前缘推进速度逐渐增大,但增幅逐渐变缓;随着注采井距的增大,渗透率相对较小储层的水驱前缘推进速度逐渐变快,但无因次水驱前缘却逐渐变小;随着地层原油粘度的降低,渗透率相对较小储层的水驱前缘推进速度逐渐变快,且增幅逐渐变大。

关键词:特低渗透 多层油藏 水驱前缘 启动压力梯度 渗透率级差 注采压差 注采井距

中图分类号: TE348

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)02-0074-03

特低渗透油藏的储层喉道细小,微观结构复杂,流体在其中的流动规律偏离达西定律^[1-8]。室内实验及油田生产实践表明:油、水在特低渗透多孔介质中的流动具有非线性特征,并存在启动压力梯度^[9-11]。对于多孔介质内部微尺度下的低速流动,固体表面的作用不容忽视,这种作用甚至能够使水这种牛顿流体在一定条件下呈现非牛顿流体特征,从而使水相具有启动压力梯度。由于地质环境和沉积条件的不同,特低渗透多层油藏的物性(如孔隙度和渗透率等)均存在一定差异,这种层间差异在注水开发时会造成不同层位水驱前缘推进速度不同^[12-13]。在特低渗透油藏的开发过程中,由于启动压力梯度的存在,导致这种情况更为突出,加剧了层间矛盾。为此,笔者利用特低渗透油藏的储层物性,根据特低渗透油藏的渗流理论,考虑油水两相启动压力梯度,建立理论模型,进而推导该类油藏注水开发时水驱前缘的计算公式,并通过实例分析了渗透率级差、注采压差、注采井距和地层原油粘度等对注水推进速度的影响。

1 理论模型的建立

为研究特低渗透油藏不同储层水驱前缘推进

的差异,建立了相应的理论模型。将储层分为上、下2层,层间互不连通,不考虑层间窜流,2层共用1个注采压力系统,忽略地层厚度引起的静水柱压差,假设水驱油是活塞驱替,地层油、水粘度不随压力的改变而改变。

以反韵律油藏为例,即上层储层的渗透率大于下层储层的渗透率,水驱前缘在推进过程中,注水井压力与采油井压力的差值不变,即注采压差恒定。在上层储层水驱前缘到达采油井之前,其产量为变量。假设上层储层某一时刻的水驱前缘与注水井距离为 L_1 ,由广义达西定律^[14]可得

$$Q_1 = \frac{10K_1 A(p_1 - p_{1m} - G_{w1} L_1)}{\mu_w L_1} = \frac{10K_1 A[p_{1m} - p_2 - G_{o1}(L - L_1)]}{\mu_o(L - L_1)} \quad (1)$$

式中: Q_1 为上层储层的产量, cm^3/s ; K_1 为上层储层的渗透率, μm^2 ; A 为上层储层的渗流截面积, cm^2 ; p_1 为注水井压力,MPa; p_{1m} 为上层储层的水驱前缘距注水井 L_1 处的压力,MPa; L_1 为上层储层的水驱前缘与注水井距离,cm; G_{w1} 和 G_{o1} 分别为上层储层的水相和油相启动压力梯度,MPa/cm; μ_w 和 μ_o 分别为地层水和地层原油的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; p_2 为采油井压力,MPa; L 为注采井距,cm。

收稿日期:2013-01-16。

作者简介:徐庆岩,男,在读博士研究生,从事低渗透油藏工程和数值模拟研究。联系电话:13651045892, E-mail: xqingyan007@163.com。
基金项目:国家科技重大专项“特低渗透油藏有效补充能量开发技术”(2008ZX05000-013-02),国家油气重大专项“特低渗透油藏有效开发技术”(2011ZX0513-006)。

上层储层中流体的流速为

$$v_1 = \frac{Q_1}{A} \quad (2)$$

式中: v_1 为上层储层中流体的流速, cm/s。

将式(1)代入式(2), 简化得

$$v_1 = \frac{10K_1[\Delta p - G_{w1}L_1 - G_{o1}(L - L_1)]}{\mu_w L_1 + \mu_o(L - L_1)} \quad (3)$$

式中: Δp 为注采压差, MPa。

假设在一段足够小的时间内, 水驱前缘以 v_1 的速度向前推进了 dL_1 的距离, 则水驱前缘从注水井到达采油井所需要的总的的时间可以用定积分的方法算出, 结合式(3)可得

$$T = \int_0^L \frac{1}{v_1} dL_1 = A_1 L + B_1 \ln(1 + C_1 L) \quad (4)$$

其中

$$A_1 = \frac{\mu_w - \mu_o}{10K_1(G_{o1} - G_{w1})} \quad (5)$$

$$B_1 = \frac{(\mu_o - \mu_w)\Delta p}{10K_1(G_{o1} - G_{w1})^2} + \frac{\mu_w L}{10K_1(G_{o1} - G_{w1})} \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{G_{o1} - G_{w1}}{\Delta p - (G_{o1} - G_{w1})L} \quad (7)$$

式中: T 为上层储层的水驱前缘从注水井到达采油井的时间, s。

同理可得

$$v_2 = \frac{10K_2[\Delta p - G_{w2}L_2 - G_{o2}(L - L_2)]}{\mu_w L_2 + \mu_o(L - L_2)} \quad (8)$$

式中: v_2 为下层储层中流体的流速, cm/s; K_2 为下层储层的渗透率, μm^2 ; G_{w2} 和 G_{o2} 分别为下层储层的水相和油相启动压力梯度, MPa/cm。

同一时刻上层储层水驱前缘到达采油井, 下层储层水驱前缘距注水井的距离与时间的关系式为

$$L_f = \frac{\exp\left(\frac{T - A_2 L}{B_2}\right) - 1}{C_2} \quad (9)$$

其中

$$A_2 = \frac{\mu_w - \mu_o}{10K_2(G_{o2} - G_{w2})} \quad (10)$$

$$B_2 = \frac{(\mu_o - \mu_w)\Delta p}{10K_2(G_{o2} - G_{w2})^2} + \frac{\mu_w L}{10K_2(G_{o2} - G_{w2})} \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{G_{o2} - G_{w2}}{\Delta p - (G_{o2} - G_{w2})L} \quad (12)$$

式中: L_f 为上层储层注水突破时下层储层水驱前缘距注水井的距离, cm。

根据式(4)可以先计算出上层储层注水突破的时间, 再依据时间相等的原则, 根据式(9)通过试算法计算出下层储层的水驱前缘距注水井的距离。

2 实例计算及影响因素

2.1 实例计算

以某油田为例, 其注采井距为 300 m, 地层原油粘度为 2 mPa·s, 地层水粘度为 0.4 mPa·s, 注水井与采油井之间的注采压差为 20 MPa。根据实验室测得该油田特低渗透储层流体渗流的启动压力梯度, 其符合的关系式为

$$G_w = 0.10K^{-0.92} \quad (13)$$

$$G_o = 0.34K^{-0.65} \quad (14)$$

式中: G_w 和 G_o 分别为水相和油相的启动压力梯度, MPa/cm; K 为储层的渗透率, μm^2 。

先前推导了考虑油相和水相启动压力梯度的水驱前缘公式, 而渗透率级差、注采压差、注采井距和地层原油粘度对于多层系的层间注水推进产生不同的影响。通过具体的实例计算分别进行研究。

2.2 影响因素

2.2.1 渗透率级差

以 4 层油藏(自上而下分别为 M1, M2, M3 和 M4 层)为例进行研究, M1 层为参考层, M2—M4 层为目标层, 渗透率级差为各目标层与参考层的渗透率级差。M1, M2, M3 和 M4 层的渗透率分别为 10×10^{-3} , 5×10^{-3} , 2×10^{-3} 和 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 当 M1 层注水突破时, 计算其他各层的水驱前缘距注水井的距离。结果表明, M2, M3 和 M4 层的水驱前缘距注水井的距离分别为 96.26, 30.59 和 12.6 m; 反映出随着储层渗透率的减小, 水驱前缘距注水井的距离越来越小, 注水推进的速度越来越慢。在开发过程中, 应考虑渗透率级差的影响, 当 2 层渗透率级差很大时(如 M1 和 M4 层), 渗透率较小储层注水推进的速度较慢, 严重影响了开发效果。

2.2.2 注采压差

以 2 层油藏(自上而下分别为 M1 和 M2 层)为研究对象, M1 和 M2 层的渗透率分别为 10×10^{-3} 和 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 注采压差分别为 10, 15, 20, 25 和 30 MPa; 当 M1 层注水突破时, M2 层的水驱前缘距注水井的距离分别为 86.68, 93.22, 96.26, 98.02 和 99.16 m(图 1)。结果表明, 随着注采压差的增大, 渗透率相对较小储层的水驱前缘距注水井的距离逐渐增大; 但当注采压差增大到一定程度时, 水驱前缘距注水井的距离增大的幅度逐渐变缓。

2.2.3 注采井距

以 2 层油藏(自上而下分别为 M1 和 M2 层)为

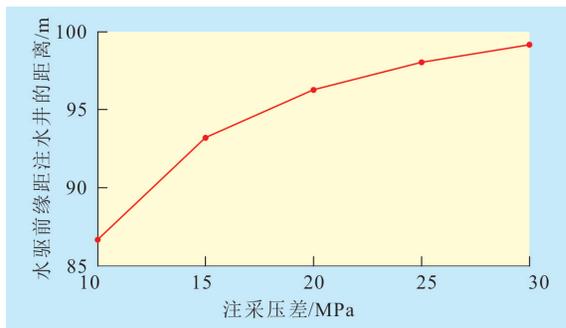


图1 水驱前缘距注水井的距离随注采压差的变化

研究对象, M1 和 M2 层的渗透率分别为 10×10^{-3} 和 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 注采井距分别为 200, 300, 400 和 500 m; 当 M1 层注水突破时, M2 层的水驱前缘距注水井的距离分别为 66.11, 96.26, 124.3 和 150.06 m。将水驱前缘距注水井的距离与注采井距的比值定义为无因次水驱前缘, 则更能反映真实的水驱前缘的变化, M2 层的无因次水驱前缘分别为 0.33, 0.32, 0.31 和 0.30。结果表明, 随着注采井距的增大, 渗透率较小的储层的注水推进速度逐渐变快, 但无因次水驱前缘却逐渐变小, 层间矛盾逐渐加剧。

2.2.4 地层原油粘度

由于地层水粘度一般变化不大, 因此仅对地层原油粘度对水驱前缘的影响进行研究。以 2 层油藏 (自上而下分别为 M1 和 M2 层) 为研究对象, M1 和 M2 层的渗透率分别为 10×10^{-3} 和 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 地层原油粘度分别为 1, 2, 3, 4, 5 和 6 mPa·s; 当 M1 层注水突破时, M2 层的水驱前缘距注水井的距离分别为 109.96, 96.26, 91.32, 88.78, 87.24 和 86.2 m (图 2)。结果表明, 随着地层原油粘度的增大, 渗透率较小储层的注水推进速度逐渐变慢, 且其降幅逐渐变缓。反映出当储层中地层原油粘度较小时, 不同储层的注水推进速度差异较小, 开发效果较好。

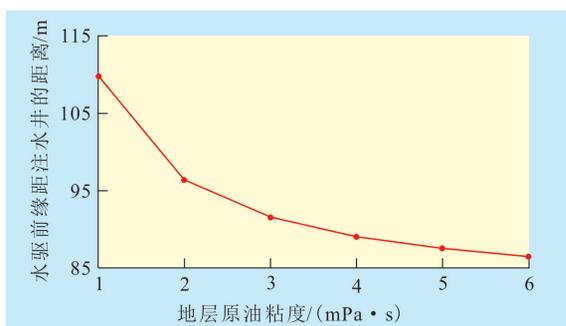


图2 水驱前缘距注水井的距离随地层原油粘度的变化

3 结束语

根据推导的多层油藏考虑油相和水相启动压

力梯度的特低渗透储层水驱前缘的计算公式, 通过实例计算对各影响因素进行分析。结果表明, 渗透率级差越大, 渗透率相对较小储层注水推进速度相对较慢, 对储层开发效果越不利; 因此, 在划分合理开发层系时, 应充分考虑渗透率级差带来的影响。随着注采压差增大, 渗透率相对较小储层水驱前缘的推进速度增大, 但注采压差增大到一定程度时, 注水推进速度增大幅度变缓; 因此在开发过程中, 注采压差增大至一定程度时, 继续增大注采压差对注水推进意义不大。随着注采井距增大, 渗透率相对较小储层的注水推进速度变快, 但无因次水驱前缘却变小, 反映出随着注采井距的加大, 层间矛盾逐渐加剧; 因此, 合理部署井距对水驱前缘的推进十分重要。随着地层原油粘度的减小, 渗透率相对较小储层的水驱前缘推进速度逐渐变快, 且增幅也逐渐变快; 因此, 对于稠油油藏, 降低其粘度可减小层间矛盾, 改善开发效果。

参考文献:

- [1] 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): 72-76.
- [2] 张贤松, 谢晓庆, 陈民锋. 低渗透断块油藏合理注采井距研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 94-96.
- [3] 韩洪宝, 程林松, 张明禄. 特低渗透油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 49-53.
- [4] 吴忠宝, 甘俊奇, 曾倩. 低渗透油藏二氧化碳混相驱油机理数值模拟[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(3): 67-70.
- [5] 时宇, 杨正明, 黄延章. 低渗透储集层非线性渗流模型研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 731-734.
- [6] 熊伟, 雷群, 刘先贵, 等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 232-236.
- [7] 杨正明, 于荣泽, 苏致新, 等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 94-98.
- [8] 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.
- [9] 徐绍良, 岳湘安. 低速非线性流动特性的实验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 60-63.
- [10] 李洋, 雷群, 刘先贵, 等. 微尺度下的非线性渗流特征[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 336-340.
- [11] 何贤科, 陈程. 低渗透油层有效动用的注采井距计算方法[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2): 216-218.
- [12] 李捷, 杨正明, 邱勇松. 表外油层注水开发的指进现象研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(2): 21-22, 28.
- [13] 邱勇松, 杨正明, 李捷, 等. 低渗透油层注水开发的层间突进研究[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2003, 18(1): 27-29.
- [14] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2006.