

文章编号 :1001-3873(2008)05-0626-03

一种确定低渗透油藏启动压力梯度的新方法

陶 军¹, 姚 军², 范子菲¹, 吴向红¹, 赵 伦¹

(1. 中国石油 国际海外研究中心, 北京 100083 2. 中国石油大学, 山东 东营 257061)

摘 要 原油中的表面活性组分在多孔介质的孔道壁上吸附形成了边界层, 从而使得低渗透油藏的启动压力梯度远大于中高渗透油藏的启动压力梯度。首先分析了边界层的形成及影响因素, 然后建立一个孔隙网络模型来进行渗流模拟。通过在孔道中引入边界层, 可以利用孔隙级网络模型作出压力梯度与渗流速度之间的关系曲线, 即渗流曲线。由渗流曲线便可进一步确定启动压力梯度。该方法首次在确定启动压力梯度时直接考虑了边界层的影响, 而且将孔隙级网络模型的应用进一步扩展到了低渗透油藏。

关键词 网络 模型 渗流 低渗透油气藏 启动压力

中图分类号: TE312

文献标识码: A



低渗透油藏平均孔隙喉道半径要明显小于中高渗透油藏。原油中的表面活性物质在孔道表面吸附, 进而形成不易流动的边界层, 即使很薄也会对低渗透油藏中原油的流动产生极大的影响。计算表明, 当边界层厚度为 $1 \mu\text{m}$, 孔道平均半径为 $10 \mu\text{m}$ 时, 边界层流体占

孔道中总流体的 19%, 而当孔道平均半径为 $5 \mu\text{m}$ 时, 边界层流体将占孔道中总流体的 36%。由此可见, 边界层的产生会对低渗透油藏中的渗流产生重大的影响。目前国内外已有众多学者就低渗透油藏渗流机理展开了研究, 并在低渗透油藏因边界层影响而存在着较大的启动压力梯度方面形成了共识^[1-3]。

启动压力梯度的确定通常有物理模拟、数值实验和试井解释 3 种方法^[4]。这 3 种方法各有其优缺点。本文在分析边界层的形成及其影响因素的基础上, 以储集层岩石这种多孔介质的孔隙孔喉结构特征为依据, 结合流体与多孔介质间的相互作用, 利用孔隙级网络模型计算出了低渗透油藏中的平均启动压力梯度。

1 渗流边界层的形成及影响因素

不同油田的原油, 甚至是同一油田的原油在成分和物理性质方面都有很明显的差异, 但是不管差异有多大, 所有的原油中都或多或少地含有一定量的表面活性物质, 它们能够在孔隙通道表面形成原油极性组

分的吸附层。正是吸附层的产生, 导致了位于孔道中央的流体与位于孔道壁面附近的流体具有不同的性质。通常把紧靠多孔介质孔道壁而形成的性质受界面现象影响的流体称为边界流体, 边界流体在紧贴固相表面所形成的液体层即为边界层^[5]。由此可见, 渗流中的边界层概念有别于流体力学中的边界层概念。

在原油边界层的物理性质中, 厚度是最为重要的。已经有不少学者通过实验测定原油边界层的厚度及其影响因素。总的说来, 影响原油边界层厚度的因素主要有原油的物理化学性质, 如胶质沥青质含量及粘度、孔隙喉道形状、驱替压力梯度等。由于影响因素众多, 很难从理论上推导出可以直接用于计算原油边界层厚度的公式, 通常是在一定的实验基础上, 通过对实验数据的拟合而提出经验公式^[6]。本文在总结前人实验数据的基础上^[7], 提出利用下面的公式来计算圆形孔道中原油边界层厚度:

$$h = a \ln G + b, \quad (1)$$

$$a = 0.000\ 071 \ln r - 0.059\ 5, \quad (2)$$

$$b = -0.046\ 2 \ln r + 0.713\ 5. \quad (3)$$

2 孔隙级网络模型的建立

为了模拟低渗透油藏储集层岩石, 建立了一个三维随机立方孔隙网络模型。由于岩石孔隙、喉道的尺寸大小不尽相同, 通常用分布函数来描述。在实际的储集层岩石中, 孔隙尺寸往往满足一定的概率分布。大多数的研究表明, 储集层岩石的孔隙尺寸通常满足单峰正态分布, 本文采用截断的韦泊分布来描述孔隙、喉道半径。同时, 实际孔隙喉道截面形状非常复

杂,在此为了简化,用圆形来代表孔隙喉道截面形状,最后形成如图 1 所示的孔隙网络模型,模型相关参数见表 1。进行流动模拟时,假设网络模型的入口端所有孔隙通过孔喉与油藏相连,模型最初完全饱和原油。从入口端往模型中注入原油,经网络模型后从出口端流出。

从表 1 和图 1 可以看出,所建模型中最大孔喉半径为 2 μm,最小孔喉半径为 0.2 μm,符合一般低渗透油藏中孔隙喉道半径大小分布。在不考虑边界层影响的情况下,其绝对渗透率约为 6.267 37×10⁻³ μm²,也在低渗透油藏的渗透率值范围之内。

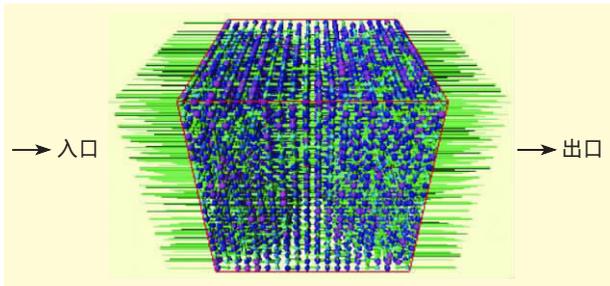


图 1 规则三维立方孔隙网络模型示意

表 1 规则三维立方孔隙网络模型参数

参数	取值	参数	取值
孔隙数	20×20×20	最小孔喉半径(μm)	0.2
孔喉数	16 448	孔喉比	1.0-5.0
平均配位数	4	绝对渗透率(10 ⁻³ μm ²)	6.267 37
最大孔喉半径(μm)	2	孔隙度(%)	26.19

3 利用孔隙级网络模型计算低渗透油藏启动压力梯度的方法

在利用上一部分中所建立的孔隙网络模型模拟原油在孔隙的流动过程时,整个模型中所有孔隙孔喉初始时全部饱和原油,假设流动为单相不可压缩流^[7-10]。以孔隙为节点,在不可压缩流的条件下流入流出孔隙的原油体积相等,有

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} = 0. \quad (4)$$

孔隙间流量按(5)式计算:

$$q_{ij} = \frac{g_{ij}}{L_{ij}} (p_i - p_j). \quad (5)$$

由于在此只作原油的单相流动研究并且所有孔隙截面形状都假设为圆形,引入边界层后,传导率的计算公式为

$$g = \frac{\pi(r-h)^4}{8\mu}. \quad (6)$$

r, μ, h 的大小由(1)式确定。从(6)式可以看出,

在每一个孔喉中,由于边界层的影响,将会使传导率的计算发生变化,进而影响整个模型的压力场和流量场分布,最终导致原油在模型中的流动发生变化。

在给定孔隙网络模型出入口端面之间的压差条件下,对于网络模型中的所有孔隙应用方程(5),并把(5)式代入(4)式中得到一组线性方程组,求解该方程组便得到网络模型中孔隙间压力分布。将孔隙间的压力代入(5)式可求解出孔隙间流量分布。对孔隙出入口端面上的所有孔隙的流量求和、取平均后就得到给定压差下流经孔隙的总流量。知道流量与压差后可由达西公式求得模型的绝对渗透率

$$K = \frac{\mu QL}{A \Delta p}. \quad (7)$$

总流量除以网络模型的截面积便是渗流速度。取不同的出入口端面压差(即不同的压力梯度),并利用孔隙级网络模型计算相应的渗流速度,可以作出原油在孔隙网络模型中流动时的渗流曲线。根据渗流曲线的形态即可确定低渗透油藏的启动压力梯度。

4 结果分析

图 2 为所建立模型的渗流曲线。从图 2 可以看出,当驱替压力梯度较低时,渗流速度并不是按照中高渗透油藏那样随压力梯度线性变化。当驱替压力梯度增加到一定程度后,原油在模型中的流动进入线性渗流区也就是达西渗流。由线性渗流区的渗流曲线可以回归出一条直线,直线与压力梯度轴的交点即为平均启动压力梯度。根据图 2 可以得到所建代表低渗透油藏的孔隙级网络模型的启动压力梯度为 0.083 MPa/m。由此可见,所采用的算法及模型是能够正确反映低渗透油藏渗流特征的。

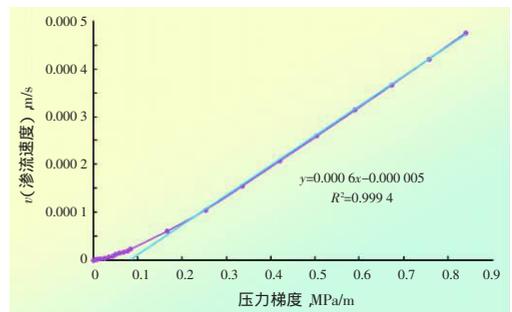


图 2 孔隙网络模型模拟低渗透油藏的渗流曲线

由(7)式可以计算不同压力梯度下的渗透率。图 3 为计算结果,从图 3 可以看出,当驱替压力梯度较小时,由于边界层的存在,将会使模型的渗透率小于不考虑边界层时的渗透率。随着驱替压力梯度的增加,孔隙喉道中不流动边界层的厚度减小,介质的渗透率逐渐增大。

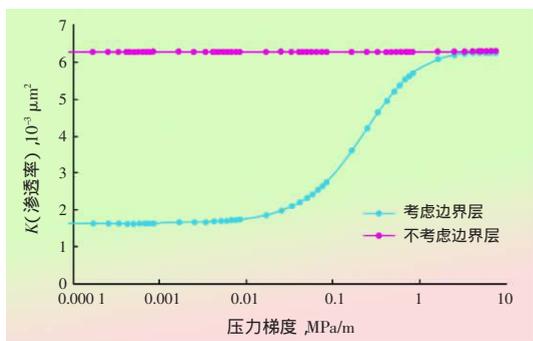


图3 考虑边界层时不同压力梯度下的渗透率

当驱替压力梯度大于一定值后,孔隙喉道中的边界层厚度受驱替压力梯度的影响减小,介质的渗透率不再发生变化,此时考虑与不考虑边界层影响的渗透率相等,流体在介质中的流动符合达西线性渗流。

5 结论

(1) 原油中的活性组分在油藏岩石这种多孔介质的孔道表面吸附形成了渗流边界层,其厚度受压力梯度等多种因素的影响。

(2) 利用计算机模拟技术建立了一个三维随机立方孔隙网络模型,在网络模型的孔隙喉道中引入边界层,计算不同压力梯度下原油在网络模型中的渗流速度,由此可作出一条渗流曲线,通过对曲线形态的分析可以确定启动压力梯度。

(3) 本文所提出的方法充分地考虑了低渗透油藏渗流边界层的影响,并利用了孔隙级网络模型可以明确地表征每一个孔隙和孔喉的优点。如果在建立模型时更多地引入真实岩心的结构特点,使得所建模型能够代表真实岩心,那么本文所提出的研究低渗透油藏启动压力梯度的方法将会进一步拓展孔隙级网络模型的应用领域。

符号注释

A ——模型截面积 μm^2 ;
 a b ——系数;
 G ——驱动压力梯度 MPa/m ;

g_{ij} ——两孔隙间的传导率,其大小与孔隙形状及孔隙中流体分布有关;

h ——原油边界层厚度 μm ;

L ——模型长度 μm ;

L_{ij} ——孔隙间距离 μm ;

n ——与孔隙 i 相连的孔隙数;

p_i p_j ——分别为孔隙 i 和 j 的压力 MPa ;

Q ——模型 Δp 压差下的总流量 m^3/s ;

q_{ij} ——体积流量 m^3/s ;

r ——圆形孔道半径 μm ;

r ——孔隙喉道半径 μm ;

Δp ——模型两端所加压力差 MPa ;

μ ——为原油粘度 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

参考文献:

- [1] 吕成远,王健,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.
- [2] 韩洪宝,程林松,张明禄,等.特低渗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.
- [3] 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.
- [4] 刘曰武,丁振华,何凤珍.确定低渗透油藏启动压力梯度的三种方法[J].油气井测试,2002,11(4):1-4.
- [5] 陈元千.低渗透油层渗流机理[M].北京:石油工业出版社,1998:30-31.
- [6] 李中锋,何顺利.低渗透储层原油边界层对渗流规律的影响[J].大庆石油地质与开发,2005,24(2):57-59.
- [7] 马尔哈辛.油层物理化学机理[M].李殿文,译.北京:石油工业出版社,1987:117-153.
- [8] Patzek T W.Verification of a complete pore network simulator of drainage and imbibition[J].SPE,2001,6:144-156.
- [9] Oren P E, Stig Bakke, Arntzen O J. Extending predictive capabilities to network models[A].SPE 52052,1998.
- [10] Stig Bakke, Oren P E. 3-D pore-scale modeling of sandstones and flow simulations in the pore networks[A].SPE 35479, 1997.

A New Method for Determination of Start-Up Pressure Gradient in Low Permeability Reservoir

TAO Jun¹, YAO Jun², FAN Zi-fei¹, WU Xiang-hong¹, ZHAO Lun¹

(1.International Research Center, CNPC, Beijing 100083, China; 2.China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: The adsorption of crude oil surfactant component in the wall of pores and throats forms a boundary layer which has more influence on low permeability reservoirs than that on high permeability reservoirs. It is this boundary layer that causes start-up pressure gradient in low permeability reservoirs to be much higher than that in middle-high permeability reservoirs. In this paper, the formation of boundary layer and its influence factors are analyzed, and then a pore scale network model is developed for percolation simulation, finding out a flow curve between pressure gradient and flow velocity, by which determining the start-up pressure gradient. This method studies the start-up pressure gradient by considering the effect of boundary layer directly for the first time. In addition, it extends the usage of pore scale network model to low permeability reservoirs.

Key Words: network; model; percolation; low permeability reservoir; start-up pressure