

流体边界层对低渗透油藏渗流特征的影响

刘卫东^{1,2}, 刘吉¹, 孙灵辉^{1,2}, 李洋², 兰喜艳³

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552

摘要 低渗透油藏孔喉细小、孔隙结构复杂, 固液界面相互作用力很大, 在靠近孔喉壁面处存在一层流体边界层, 阻碍流体在孔喉中的流动。为研究流体边界层对低渗透油藏流体渗流特征的影响, 以去离子水在半径分别为 10.0、7.5 和 5.0 μm 的微圆管中流动的实验数据为基础, 通过数据拟合分析, 确定了流体流动速度、边界层厚度与压力梯度之间的关系。结果表明, 由于流体边界层的存在, 低压条件下, 去离子水在不同半径微圆管中的流动偏离经典的达西流动规律, 表现出非线性特征, 且存在启动压力梯度; 随着管径的降低, 流动偏离达西渗流规律的程度增大, 非线性越发明显; 随压力梯度增加, 流体边界层厚度呈指数规律递减, 压力增大到一定程度后, 趋于定值。运用不等径毛管束模型, 给出低渗透油藏单相流体渗流公式。

关键词 流体边界层; 非线性渗流; 低渗透油藏; 不等径毛管束模型

中图分类号 TE311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.22.004

Influence of Fluid Boundary Layer on Fluid Flow in Low Permeability Oilfields

LIU Weidong^{1,2}, LIU Ji¹, SUN Linghui^{1,2}, LI Yang², LAN Xiyan³

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, Huabei Oilfield, China National Petroleum Corporation, Renqiu 062552, Hebei Province, China

Abstract A fluid boundary layer would impede the flow of fluid near the pore and the throat of the rock in the low-permeability reservoir because of the small size of pore-throat, the complex pore structures and the large solid-liquid interfacial force. In order to study the influence of the fluid boundary layer on the fluid flow in a low permeability reservoir, the relationships between the fluid flow rate, the boundary layer thickness and the pressure gradient are obtained through analysis and fitting data, based on the experimental results of deionized water flowing through microtubes of radii of 10.0, 7.5 and 5.0 μm , respectively. It is indicated that, due to the existence of the fluid boundary layer, the flow of deionized water through microtubes with different radii deviates from the classical Darcy flow pattern and shows nonlinear characteristics with a threshold pressure gradient under low pressure conditions. The degree of deviation of the flow pattern from the law of Darcy flow increases and the nonlinearity of the flow becomes more significantly with the decrease of the tube diameter. The fluid boundary layer thickness decreases exponentially with the pressure gradient and tends to assume a stable value when the pressure gradient approaches a critical value. The formula for single-phase fluid seepage in a low permeability reservoir is obtained based on the non-equivalent diameter capillary module.

Keywords fluid boundary layer; nonlinear flow; low permeability reservoir; non-equivalent diameter capillary module

0 引言

国内通常将渗透率在 $(0.1-50)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的油藏定义为

低渗透油藏^[1], 由于低渗透储层孔喉细小、流动通道细微、固液界面相互作用力显著、渗流阻力很大, 流动规律偏离经典

收稿日期: 2011-06-29; 修回日期: 2011-07-14

基金项目: 国家科技重大专项 (2008ZX05013-002)

作者简介: 刘卫东, 高级工程师, 研究方向为油田化学与提高采收率, 电子邮箱: lwd69@petrochina.com.cn

的达西渗流,存在启动压力梯度,呈现出非线性的特征^[2-3]。黄延章^[4]认为渗流流体应分为体相流体和边界流体,边界流体的存在是导致流体流动呈非线性的主要原因。Mara 和 Li^[5]研究了水在熔融硅圆管和不锈钢管中的流动,发现实验压力梯度高于泊肃叶流(Poiseuille flow)理论预测值;李中锋等^[6]通过低渗透岩心渗流物理实验,分析了原油边界层厚度与毛管半径、压力梯度、流体黏度和组分的关系;孙尚武等^[7]通过水和硅油在不同管径的微圆管中流动实验,发现 Navier-Stokes 方程仍然适用,但其实验所用微圆管管径较大;徐绍良等^[8-9]研究了去离子水在不同内径微圆管中的流动特性,发现在较小内径的微圆管中,流体流动呈现明显的非线性,通过拟合得到去离子水在微圆管中的有效流动半径公式和基于边界层流体的不同半径毛管束视渗透率公式,并对比了视渗透率与理论渗透率之间的关系;王斐等^[10]研究了水在亲水和憎水的微圆管中的流动,发现流动特性偏离经典理论,偏离程度受润湿性影响。本文通过去离子水在不同半径微圆管中的流动实验,系统研究了边界层厚度随压力梯度的变化及其对渗流规律的影响,并以此为基础推导出基于不等径毛管束模型的低渗透油藏单相流体非线性渗流公式。

1 实验材料与装置

1.1 实验材料

实验所用流体为经过杀菌、过滤、脱气后的去离子水,26℃时黏度为 0.8737mPa·s;所用微圆管采用 PolyMicro 公司制造的熔融石英毛细管系列产品,微圆管与测量管的内径通过 Quanta200 环境扫描电镜(ESEM)测得,精度为 0.05μm,微圆管长度通过电子数显卡尺测得,精度为 0.02mm。

1.2 实验装置

如图 1 所示,经高压氮气瓶出来的气体通过减压阀使压力降低到所需压力,进入储液罐并驱动其中流体进入微圆管和测量管中,用光电感应式微流量计得到测量管中气液界面移动一定距离所需时间,从而得到流体流量。

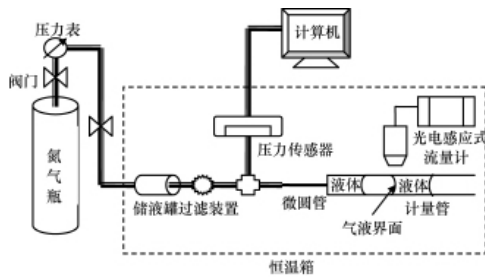


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experiment equipment

2 非线性渗流特征验证

实验所用去离子水可压缩性很小,其在微圆管中的流动可认为是不可压缩流动,另外,由于雷诺数较小,流动属于层流流动。根据 Hagen-Poiseuille(H-P)方程得到理论平均流速与压力梯度关系式

$$V_{th} = \frac{r^2 \Delta p}{8\mu L} \quad (1)$$

其中, V_{th} 为理论流速, $m \cdot s^{-1}$; r 为微圆管半径, μm ; Δp 为微圆管两端压差,MPa; μ 为流体黏度, $Pa \cdot s$; L 为微圆管长度,m。

通过实验数据求得不同压力梯度下各微圆管中实际流速为

$$V_{exp} = \frac{l}{\Delta t} \frac{R^2}{r^2} \quad (2)$$

其中, V_{exp} 为实际流速, $m \cdot s^{-1}$; l 为气液界面移动距离,m; Δt 为时间,s; R 为计量管半径,m。

分别绘制理论流速、实际流速与压力梯度的关系,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,各微圆管中实际流速均偏小于理论流速,且随着管径的减小,偏离程度变大。

流体在微圆管中流动时,由于固体壁面对近壁流体分子的吸引力以及流体分子之间的相互作用力,在微圆管内表面形成流体边界层。较低压力梯度时,这部分流体不参与流动,因而使得实际流速偏离理论值;随着管径变小,边界层流体越来越厚,不参与流动的流体所占比例越多,实际流速与理论流速偏离程度越大。

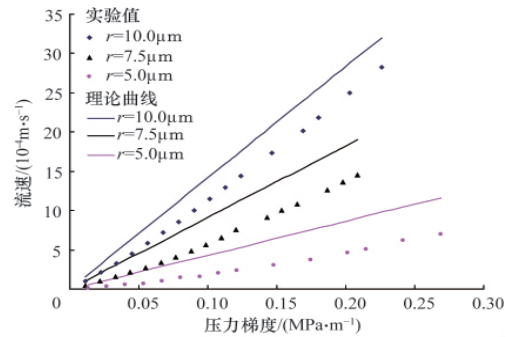


图 2 微圆管流速与压力梯度关系曲线

Fig. 2 Relationship between velocity of microflow and pressure gradient

对实际流速与压力梯度进行拟合,得到关系式如表 1 所示。其中, v 为流速, $\Delta p/L$ 为压力梯度。式中 a 、 b 分别表示流体黏度和边界层对流动的影响, c 表示启动压力梯度项。

表 1 流速与压力梯度拟合关系

Table 1 Fitted formula between velocity and pressure gradient

微圆管半径/ μm	拟合方程 $v=a(\Delta p/L)^2+b(\Delta p/L)-c$	相关系数
10.0	$v=0.0107(\Delta p/L)^2+0.0102(\Delta p/L)-8 \times 10^{-6}$	0.9997
7.5	$v=0.0096(\Delta p/L)^2+0.0049(\Delta p/L)-3 \times 10^{-5}$	0.9993
5.0	$v=0.0031(\Delta p/L)^2+0.0019(\Delta p/L)-4 \times 10^{-5}$	0.9973

从拟合情况来看,方程相关系数较高,微圆管实际流速与压力梯度呈二次函数关系,证明了非线性渗流的存在。

3 边界层

考虑到微圆管边界层,H-P 方程可改写为

$$Q = \frac{\pi(r-\delta)^4 \Delta p}{8\mu L} \quad (3)$$

其中, Q 为流量; δ 为微圆管边界层厚度。

实验测得微圆管流量可表示为

$$Q = \frac{\pi R^3 l}{\Delta t} \quad (4)$$

可得边界层厚度随压力梯度变化关系为

$$\delta = r - \sqrt[4]{\frac{8\mu R^3 l}{\Delta t} \frac{L}{\Delta p}} \quad (5)$$

根据实验结果, 绘制微圆管边界层厚度随压力梯度变化曲线, 如图 3 所示。

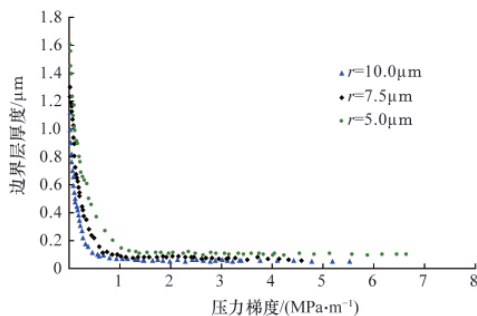


图 3 微圆管边界层厚度与压力梯度关系图

Fig. 3 Relationship between boundary layer and pressure gradient

由图 3 可以看出, 随着压力梯度的不断增加, 微圆管中流体边界层厚度逐渐减小, 压力梯度小于 $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 随着压力梯度的增加, 流体边界层厚度急剧减小; 压力梯度大于 $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 随着压力梯度增加, 边界层厚度基本保持不变, 此时的厚度为固化层厚度; 随着管径的减小, 边界层厚度逐渐增大, 流动的非线性越发明显。

运用 Matlab 数学软件, 根据公式 $\delta = a_1 + r \exp(b_1 \frac{\Delta p}{L} + c_1)$ 对所得数据进行拟合, 其中 a_1 为固化层厚度, b_1 和 c_1 是与固体壁面和流体性质有关的参数, 得到结果如表 2 所示。

表 2 边界层厚度与压力梯度拟合关系

Table 2 Fitted formula between boundary layer and pressure gradient

微圆管半径/ μm	a_1	b_1	c_1	相关系数
10.0	0.055878	-7.045	-2.225	0.9956
7.5	0.074403	-5.068	-1.797	0.9969
5.0	0.10667	-3.687	-1.300	0.9927

进一步分析, 可得毛细管中边界层厚度表达式

$$\begin{cases} \delta = a_1 + r \exp(b_1 \frac{\Delta p}{L} + c_1) \\ a_1 = -0.08568 \ln r + 0.2526 \\ b_1 = -1.588 \exp(0.1488r) \\ c_1 = -0.2073r - 0.1547 \end{cases} \quad (6)$$

根据不等径毛管束模型, 岩心流量为

$$\begin{cases} \phi = \sum_{i=1}^n \frac{N x_i r_i^2}{R_0^2} \\ Q = \sum_{i=1}^n \frac{N \pi x_i (r_i - \delta)^4 \Delta p}{8 \mu L} \end{cases} \quad (7)$$

其中, ϕ 为岩心孔隙度; R_0 为岩心半径; x_i 为不同半径毛细管所占比例; r_i 为不同毛细管半径; N 为等价毛管数。

式(6)、式(7)即为基于不等径毛管束模型的低渗透油藏单相流体渗流方程, 岩心喉道半径大小及其分布情况可通过恒速压汞等其他方法获得。

4 结论

(1) 低压力梯度下, 去离子水在半径 $10.0, 7.5$ 和 $5.0 \mu\text{m}$ 的微圆管中流动均表现出非线性特征, 管径越小, 非线性特征越明显。

(2) 流体边界层的存在是微圆管中流动产生非线性特征的主要原因, 随着压力梯度的增加, 边界层厚度逐渐变小, 压力梯度较低时, 边界层随压力梯度的减小迅速变薄; 压力梯度较高时, 边界层厚度基本不随压力梯度而变化, 保持一定值(固化层)。

(3) 根据实验数据, 基于不等径毛管束模型, 推导出低渗透油藏单相流体渗流方程。

参考文献 (References)

- [1] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 4-9.
Li Daopin. Effective development technique of low permeability oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 4-9.
- [2] 肖鲁川, 甄力, 郑岩. 特低渗透储层非达西渗流特征研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 27-30.
Xiao Luchuan, Zhen Li, Zheng Yan. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2000, 19(5): 27-30.
- [3] 姚约东, 葛家里. 低渗透油层非达西渗流规律研究 [J]. 新疆石油地质, 2000, 21(3): 213-215.
Yao Yuedong, Ge Jiali. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2000, 21(3): 213-215.
- [4] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 30-31.
Huang Yanzhang. Porous flow mechanics for low permeability reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 30-31.
- [5] Mara G M, Li D Q. Flow characteristics of water in microtubes [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1999, 20(2): 142-148.
- [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.
Li Zhongfeng, He Shunli. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2005, 24(2): 57-59.
- [7] 孙尚武, 凌智勇, 杨继昌, 等. 两种液体在微圆管道内流动特性的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2005(7): 112-113.
Sun Shangwu, Ling Zhiyong, Yang Jichang, et al. *Machinery Design & Manufacture*, 2005, 7: 112-113.
- [8] 徐绍良, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 边界层流体对低渗透油藏渗流特性的影响[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 26-28.
Xu Shaoliang, Yue Xiang'an, Hou Jirui, et al. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2007, 22(2): 26-28.
- [9] 徐绍良, 岳湘安, 侯吉瑞. 去离子水在微圆管中流动特性的实验研究 [J]. 科学通报, 2007, 52(1): 120-124.
Xu Shaoliang, Yue Xiang'an, Hou Jirui. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(1): 120-124.
- [10] 王斐, 岳湘安, 徐绍良, 等. 润湿性对水在微管和岩芯中流动特性的影响[J]. 科学通报, 2009, 54(7): 972-977.
Wang Fei, Yue Xiang'an, Xu Shaoliang, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(7): 972-977.

(责任编辑 刘志远)