

文章编号:1673-5005(2007)05-0060-04

低速非线性流动特性的实验研究

徐绍良^{1,2}, 岳湘安²

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 提高采收率研究中心, 北京 102249)

摘要:实验研究了去离子水在内径为 5 μm 和 2 μm 微圆管中的流动特性,并回归得到了边界层水膜厚度随剪切力的变化公式。实验结果表明,典型牛顿流体去离子水在 5 μm 和 2 μm 微圆管中表现出不同程度的非线性流动特性,管径越小,其非线性流动特性越强;微圆管的视渗透率不是常数,而是随压力梯度的增大而增大并最终趋于理论值;有效流动横截面积随压力梯度增大而增大;边界层是导致低速非线性流动特性的主要因素之一。

关键词:非线性流动特性; 边界层; 启动压力梯度; 实验研究

中图分类号:TE 348 **文献标识码:**A

Experimental research on nonlinear flow characteristics at low velocity

XU Shao-liang^{1,2}, YUE Xiang-an²

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Enhanced Oil Recovery Center in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The flow characteristics of deionized water in microtubes with diameters of 5 μm and 2 μm were investigated experimentally. And the equation of thickness variation of water film with shear stress was regressed. The experimental results indicate that typical Newtonian fluid deionized water shows different nonlinear flow characteristics in microtubes with diameters of 5 μm and 2 μm . Moreover, the smaller the diameter is, the more positive the nonlinear flow characteristics are. The apparent permeability of microtubes increases gradually to a theoretical value with pressure gradient increasing. The effective flow cross-section also increases with pressure gradient increasing. And the boundary layer is one of the main factors which results in the nonlinear flow characteristics.

Key words: nonlinear flow characteristic; boundary layer; starting pressure gradient; experimental research

流体在低渗透油藏中的低速流动呈现非线性特征,已为众多研究^[1-3]所证实。但是,目前有关低渗透油藏渗流机理的认识,基本上都来自于岩心的渗流实验。岩心渗流实验是流体在岩心孔隙中流动的宏观统计平均结果,反映了岩心孔隙结构、岩石矿物组成及表面性质、流体性质等综合因素的共同作用,无法真实地反映岩心中的渗流机理。因此,需要从微观实验入手,研究流体在细微尺度下的流动规律,以更好地解释低速非线性流动特征。

1 实验

1.1 实验材料

采用美国 Polymicro 技术公司生产的微圆管,内

径分别为 5 μm 和 2 μm 。流量计量管内径为 320 μm 。

1.2 实验装置

实验装置如图 1 所示。动力系统由高压氮气瓶、低压缓冲罐组成,氮气从高压氮气瓶中流出,经过减压阀进入低压缓冲罐,逐渐降低到实验所需压力,为实验提供动力支持。

过滤装置主要由德国 FESTO 气体过滤装置(最小过滤孔径为 1 μm)、储液罐和滤膜液体过滤装置组成。气体过滤装置主要用于过滤气体中杂质和水分并干燥气体,同时为了过滤实验流体中的微小杂质和气泡,在储液罐和微管之间设置了滤膜液体过滤装置,孔径为 0.45 μm 。

收稿日期:2006-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(50574060)和国家“973”重大基础研究前期研究专项(2002CCA00700)

作者简介:徐绍良(1978-),男(汉族),河南柘城人,博士研究生,主要从事微尺度流动和低渗透油藏开发研究。

测量系统主要由数据采集系统、电脑、压力与温度传感器、流量测量系统和显微镜组成。氮气驱动储液罐中的去离子水,通过测压测温三通进入微圆管中,微圆管另一端与流量计量管相连。

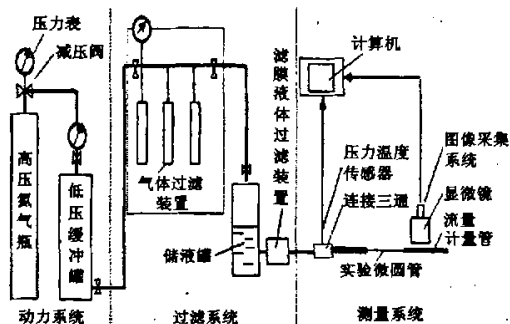


图1 实验装置

1.3 实验方法

实验中的流量测量采用位移法。通过显微镜把流量计量管中液面的移动图像传送到计算机,记录下液面移动一定距离所需要的时间,然后计算得到实验流量。根据流体力学中的质量守恒定律,流量计量管中的流量等于微圆管中流量,间接测量微圆管中的液体流量。由于实验流量很小,为防止实验液体蒸发给实验带来影响,在流量计量管末端用不易挥发的白油密封,避免测量界面与大气接触。

2 实验结果讨论

实验研究了典型牛顿流体去离子水在 $5\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 微圆管中的流动特性及其非线性流动规律。本文中分别从流动速度、视渗透率以及流动横截面积与压力梯度的关系来说明非线性流动特性。

2.1 流动速度与压力梯度的关系

流动速度随压力梯度的变化曲线如图2所示。理论值为利用 Poiseuille 方程计算结果。实验中最低流动速度为 $10.34\ \mu\text{m/s}$,这是在常规岩心驱动实验中所无法达到的。从图2中可以明显看出,实验流动速度与压力梯度的关系已不再呈直线关系,表现出不同程度的非线性流动特性。在 $5\ \mu\text{m}$ 微圆管中,在压力梯度约为 $15\ \text{MPa/m}$ 时,非线性趋势逐渐变缓,流动速度接近理论值,基本符合线性规律;对于 $2\ \mu\text{m}$ 微圆管,压力梯度直到约为 $70\ \text{MPa/m}$ 时,流动速度才基本平行并接近于理论值,但还与理论曲线存在一定的偏差。由此说明,管径越小,非线性流动特性越强,越需要较大的压力梯度才能使流动速度与压力梯度的关系曲线逐渐符合理论值。

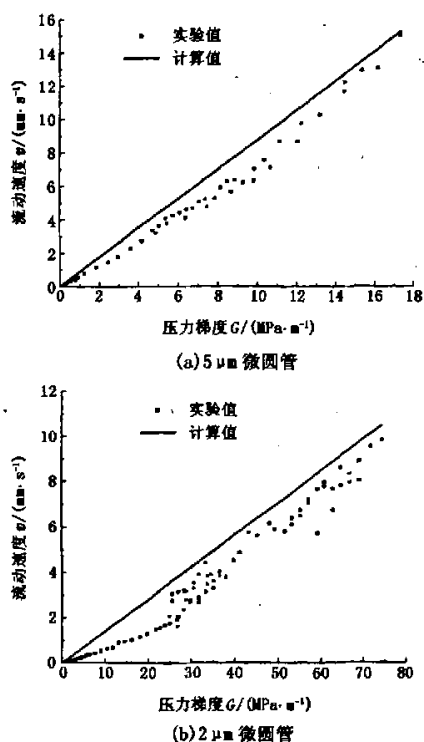


图2 流动速度随压力梯度的变化曲线

2.2 视渗透率与压力梯度的关系

图3为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 微圆管视渗透率 k 与压力梯度的关系曲线。

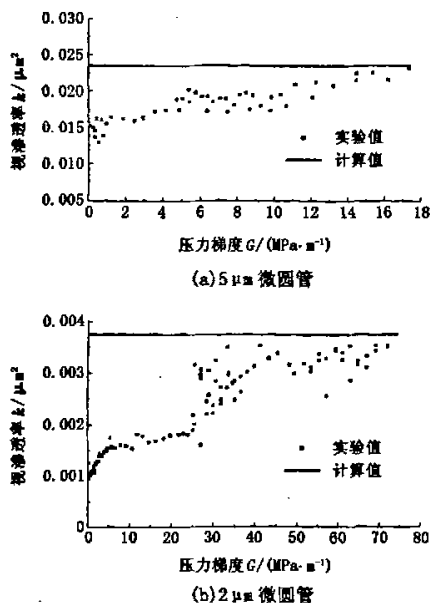


图3 视渗透率与压力梯度的关系曲线

图3中视渗透率理论值由下式计算得到

$$k = \frac{\varphi}{8T} r^2.$$

式中, k 为视渗透率, μm^2 ; r 为圆管半径, μm ; φ 为孔隙度; T 为迂曲度。为接近低渗透油藏实际情况, 分别取 $\varphi = 0.15$, $T = 5$ 。

从图3中可以看出, $5\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 微圆管中视渗透率都不是常数, 而是随着压力梯度的增加而增大, 并最终趋于理论计算值, 只不过接近于理论值所需要的压力梯度不同, 而且较小管径($2\mu\text{m}$)的视渗透率的增加幅度明显大于较大管径($5\mu\text{m}$)的增加幅度。

2.3 流动横截面积与压力梯度的关系

当流体流过多孔介质时, 在固液界面张力作用下, 在多孔介质孔隙的表面形成一个流体吸附滞留层, 即边界层, 边界层在微圆管固液壁面同样存在, 并且随着管径的减小, 比表面积增大, 边界层的作用就会变得越来越重要, 对流动横截面的影响也会越来越大。

图4为边界层厚度与微管半径之比(δ/r)随压力梯度的变化曲线。从图4中可以看出, 在 $5\mu\text{m}$ 微管中, 边界层厚度与微管半径之比最大值约为0.15, 而在 $2\mu\text{m}$ 微管中, 最大值约为0.30。可见随着管径的缩小, 边界层对流动的影响变大。同样, 有效流动半径也是随着压力梯度的增加而逐渐变大的, 也就是说, 较低压力梯度下, $2\mu\text{m}$ 微管中的边界层所占圆管半径的比例很大, 当压力梯度增加时, 壁面的剪切力增大, 使更多的流体参与流动, 有效流动半径增加, 流动的横截面积变大。

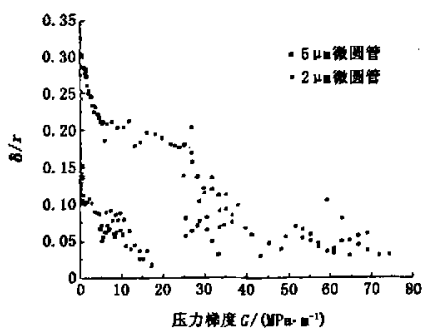


图4 边界层厚度与微管半径之比随压力梯度的变化曲线

从上述的实验结果可以看出, 典型牛顿流体去离子水在微圆管中的流动特性与目前众多的岩心实验结果是吻合的, 低渗透油藏中几个主要的渗流特征在本实验中也能得到充分体现。流动速度与压力梯度呈现明显的非线性关系; 视渗透率不是常数, 而

是随着压力梯度的变化而变化; 流体流动的横截面积也是可变的。

3 机理探讨

低渗透油藏多孔介质最为突出的特点是孔径小、比表面积大、粘土含量较高且表面电性强, 如大庆油田的渗透率为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 岩样中半径小于 $1\mu\text{m}$ 孔道体积约占总孔隙体积的35%^[4-5]。当地层流体在较小孔隙中流动时, 流体与地层岩石强烈的相互作用以及粘土矿物的分散运移、膨胀, 加强了流体与固体表面之间分子力作用^[6-7], 使得壁面附近的流体层的性质与体相流体存在较大差异^[8]。马尔哈辛^[9]和黄延章^[5]也认为在相同驱动压力梯度下, 毛管半径越小, 边界层厚度越大。

本实验结果表明, 在不考虑粘土、复杂孔隙以及表面电性的条件下, 微圆管中边界流体层的厚度与压力梯度和管径也有着密切的关系。基于实验结果拟合得到的边界层厚度与剪应力的函数关系为

$$\delta = \delta_{\infty} + (\delta_0 - \delta_{\infty}) \exp(a\tau).$$

式中, δ 为边界层水膜厚度, μm ; δ_{∞} 为稳定时的水膜厚度, μm ; δ_0 为剪应力为零的水膜厚度, μm ; a 为衰减系数; τ 为固液边界层上的剪应力, Pa 。

根据实验结果, 回归得到 $\delta_{\infty} = 0.1849$, $\delta_0 = 0.8065$, $a = -0.1186$ 。

由于固液界面分子力作用随微管半径增大而单调递减, 导致了边界层厚度与微管半径的比值变大, 边界层对液体流动的影响增强; 随着压力梯度的增加, 边界层附近的剪切力增加, 边界层厚度不断减薄, 有效流动半径增大, 视渗透率和流动横截面也相应的增大; 当剪切应力进一步增加到一定值以后, 更加靠近壁面的液体物理性质, 如密度、粘度等将发生较大变化, 壁面附着力大大增强, 壁面剪切力无法驱动这部分边界层, 边界层厚度达到稳定, 视渗透率和流动横截面无限接近并小于理论值。

在实际岩心实验中, 由于粘土含量高、表面电性强等因素的影响, 使得固液边界层流体的性质与微圆管中相差很大, 强化了岩石中表面特性对流体流动的影响, 出现了在一定压力梯度下流量较小无法测得的实验情况, 部分研究者认为在此压力梯度下无流量, 因此得出了启动压力梯度的概念。本实验中, 最小压力梯度为 0.21 MPa/m 时, 仍然有流量 $3.25 \times 10^{-5} \mu\text{L/s}$, 远远小于目前采用岩心所测得的流量。因此, 目前实验还无法得出是否存在启动压力梯度的结论, 还有待进一步的实验给予证实。

4 结 论

(1)去离子水在5 μm 和2 μm 微圆管中表现出不同程度非线性流动特性,管径越小,非线性流动特性越强。

(2)微圆管的视渗透率不是常数,而是随着压力梯度的增加而增加,最后逐渐趋近理论值;边界层厚度与管径的比值随压力梯度增加而降低;流动横截面积随压力梯度变化而变化。

(3)边界层是影响低速非线性流动特性的主要因素之一;启动压力梯度存在与否还有待进一步的实验证实。

参考文献:

- [1] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与展望问题[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 76-80.
FENG Wen-guang. Research advance and problems in non-Darcy flow at low velocity[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(4): 76-80.
- [2] 姚约东, 葛家理. 低渗透油藏不稳定渗流规律的研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(2): 55-62.
YAO Yue-dong, GE Jia-li. Non steady flow in low permeability reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 55-62.
- [3] 姚约东, 葛家理, 李相方. 低渗透油藏油水两相渗流研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(2): 52-56.
YAO Yue-dong, GE Jia-li, LI Xiang-fang. Oil-water two-phase fluid flow in low permeability reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(2): 52-56.
- [4] 谢然红, 肖立志, 张建民, 等. 低渗透储层特征与测井评价方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 47-55.
XIE Ran-hong, XIAO Li-zhi, ZHANG Jian-min, et al. Low permeability reservoir characteristics and log evaluation method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1): 47-55.
- [5] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [6] BEAR J. 多孔介质流体动力学[M]. 李竟生, 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [7] 王向英, 钟安祥. 低渗透地层粘土的稳定性[J]. 国外油田工程, 1996(1): 13-17.
WANG Xiang-ying, ZHONG An-xiang. Stability of clay in low permeability reservoir[J]. Foreign Oilfield Engineering, 1996(1): 13-17.
- [8] ALEXANDER Pertsin, MICHAEL Grunze. Water-graphite interaction and behavior of water near the graphite surface[J]. The Journal of Physics Chemistry B, 2004, 108: 1357-1364.
- [9] 马尔哈辛. 油层物理化学机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.

(编辑 李志芬)

(上接第59页)

- [5] 李明忠, 王卫阳, 赵国景. 垂直井筒井液携砂流动规律研究及其在油井生产中的应用[J]. 实验力学, 2002, 17(3): 386-391.
LI Ming-zhong, WANG Wei-yang, ZHAO Guo-jing. The flowing rules of sand carrying well fluid in vertical wellbores and its application in oil production[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(3): 386-391.
- [6] 李明忠, 王卫阳, 何岩峰, 等. 垂直井筒携砂规律研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(2): 33-35.
LI Ming-zhong, WANG Wei-yang, HE Yan-feng, et al. Experimental study on the performance of sand moving in vertical wellbore[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, 24(2): 33-35.
- [7] 李爱芬. 地层砂粒在液体中的沉降规律研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 70-73.
LI Ai-fen. Study on settling rule of formation sand in the liquid fluids[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2001, 8(1): 70-73.

(编辑 李志芬)