

微米级通道内油水两相流阻力特性研究

樊辉青, 刘磊, 钟主海, 张翔

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对低渗透油藏孔隙尺度小、采收率低的问题,采用宽度为 $200\ \mu\text{m}$ 、深度分别为 $1.8\ \mu\text{m}$ 和 $4.1\ \mu\text{m}$ 的两个矩形通道,结合数字显微摄像技术和微流体测试技术,对岩层孔隙流动进行了模拟,得到了孔隙通道中单相油以及含油率(体积分数)为 $10\%\sim 60\%$ 的油水两相流的流动特性.实验结果表明:对于深度为 $1.8\ \mu\text{m}$ 和 $4.1\ \mu\text{m}$ 的两个矩形通道,单相油流动的摩擦系数低于理论值,并与雷诺数呈线性关系;泊肃叶数小于理论预测值,通道尺度越小,泊肃叶数实验值与理论值的差异越大.油水两相流流动的摩擦系数与雷诺数也满足线性关系,在不同含油率时有的高于理论值,有的低于理论值;泊肃叶数总体随含油率增加而减小,在含油率为 20% 与 60% 时出现跳跃式增长,分析表明泊肃叶数随含油率变化是受壁面亲水性的影响.

关键词: 微通道;油水两相流;摩擦系数;泊肃叶数

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0011-05

Experimental Study on Resistance Characteristics of Oil-Water Two-Phase Flow in Channels with Micron Dimension

FAN Huiqing, LIU Lei, ZHONG Zhuhai, ZHANG Xiang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Experimental simulations were performed on the flow in pores of porous media to solve the problem of small pore and low oil recovery in low permeability oilfields. Experiments were conducted for the flow in two rectangular microchannels with $200\ \mu\text{m}$ in width, and $1.8\ \mu\text{m}$ and $4.1\ \mu\text{m}$ in depth respectively. The characteristics of oil flow and oil-water two-phase flow with the oil fraction $10\%\sim 60\%$ in volume were obtained using the digital microscopy video technology and the microfluidic testing technology. The experimental results indicate that for the two channels with $1.8\ \mu\text{m}$ and $4.1\ \mu\text{m}$ in depth, the friction factors for the oil flow are lower than theoretical values and vary linearly with Reynolds number. The experimental Poiseuille numbers are less than the predictions and the difference between them increases with the decrease in the microchannel size. Moreover, for the oil-water two-phase flow, the friction factor also varies linearly with Reynolds number but is higher or lower than the theoretical value at different oil fractions. In addition, the Poiseuille number generally decreases with the increase in the oil fraction but increases sharply when the oil fraction is 20% or 60% , showing that the change of the Poiseuille number with the oil fraction is affected significantly by the hydrophilic property of channel walls.

Keywords: microchannel; oil-water two-phase flow; friction factor; Poiseuille number

近10年来,微流动研究从微机电系统(MEMS)迅猛发展到微化学分析、血液微循环、低渗透油田开

发等领域^[1-2],微通道内流体阻力特性、阻力系数预测与分析已成为重中之重.许多学者已经对不同形

状、不同尺寸的微管道流动特性进行了研究,如 Peng^[3]和 Mala^[4]研究了直径为 50~400 μm 的通道内水的流动特性,发现微管内摩擦系数大于常规管道理论预测值,管径越小,实验值与理论值差异越大,而 Judy^[5]研究了水力直径为 15~150 μm 的方管和圆管内的流动阻力,实验所得泊肃叶数与理论值吻合,这与 Jiang^[6]和 Qu^[7]的研究结论相同.到目前为止,虽然已经有许多关于微通道流动特性方面的研究,但是微流动阻力特性与常规通道是否相同仍然存在争议.微通道制作、测量和实验过程计量的精度要求高,以及微尺度效应复杂等因素增加了微通道研究的难度.对于微通道内两相流的研究更加困难,难点在于两相流流动存在不同的流型,没有统一的模型,不同工况时流型间可以相互转化等.目前,关于微通道内液-液两相流的研究主要集中在流型、流型转化、不同流型的模型及阻力损失等^[8-9]方面,这些研究所用通道尺度通常在几十微米以上.低渗透油田岩层多孔介质孔隙尺度小至几微米,为了更好地认识低渗透油田开采过程中的油水两相流流动规律,本文选用宽度约为 200 μm、深度分别为 1.8 μm 和 4.1 μm 的两个矩形截面微通道,来研究油水两相流的阻力特性.

1 实验系统和方法

实验段通道是采用微蚀刻技术加工而成的矩形硅通道,通道上表面为高耐热薄玻璃,此设计可实现通道流动可视化研究,图 1 是显微镜拍摄的通道中去离子水流动的状态图,左侧浅色部分为空气,右侧深色部分为水,水流动尾部呈现凸液面,说明通道内壁面具有亲水性.图 2 是显微镜拍摄的通道的 3D 景深图,可以看出,实验段通道为矩形凹槽,详细几何参数见表 1.

实验流体为 7 号白油和去离子水,因为在油田开采中,油不是以单相形式存在,而是以油包水或水包油的形式存在,因此本实验将白油和去离子水按不同体积比混合,以相同转速搅拌 3 min 使其混合均匀,油水混合液的含油率(体积分数)范围为 10%~60%和 100%(即单相油).

实验系统如图 3 所示,气源提供的高压氮气由减压阀初步调节,再由压力定值器精确调节到实验段所需驱动压力,流体在此压力驱动下经过过滤器输运到实验段.实验段水平放置,出口处与体积式流量计相连接,以实现流量的计量.实验段进出口处分

别装有压力传感器,待压力信号稳定后由数据采集系统采集,最终通过统计平均得到实验段压差.

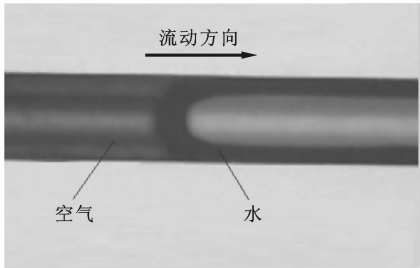


图 1 通道中去离子水流动状态

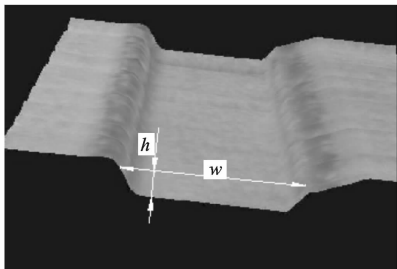
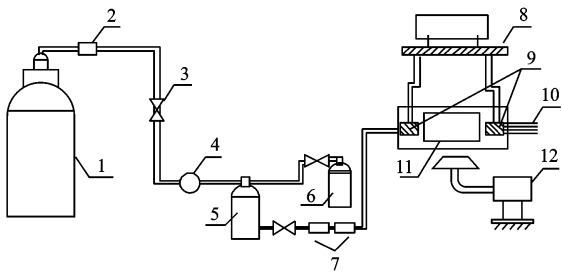


图 2 微通道 3D 景深观测图



1. 气源; 2. 减压阀; 3. 截止阀; 4. 压力定值器; 5. 储液罐;
6. 补充储液罐; 7. 过滤器; 8. 数据采集系统; 9. 压力传感器;
10. 体积式流量计; 11. 实验段; 12. 数据显微镜

图 3 实验系统图

表 1 微通道几何参数

编号	$h/\mu\text{m}$	$w/\mu\text{m}$	$h \cdot w^{-1}$	$D_h/\mu\text{m}$	L/mm	$L \cdot D_h^{-1}$
1	1.8	208.9	0.086	3.6	37.5	10 400
2	4.1	206.7	0.020	8.0	37.5	4 700

2 理论模型

对于单相流流动,雷诺数 Re 和泊肃叶数 Po 定义为

$$Re = \rho u D_h / \mu \tag{1}$$

$$Po = f Re \tag{2}$$

$$f=\frac{D_h}{L}\frac{\Delta P}{2\rho u^2}\tag{3}$$

$$D_h=2\omega h/(\omega+h)\tag{4}$$

式中: ρ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; u 为微通道平均流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; D_h 为通道水力直径, m ; μ 为流体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; L 为微通道长度, m ; ΔP 为通道进出口压差, Pa ; ω 和 h 分别为通道宽、高, m ; f 为范宁摩擦系数.

Po 是反映流动阻力特性的准则数,在经典理论中,圆管层流充分发展段的 $Po=16$. 对于矩形通道, Po 与高宽比 $\alpha(\alpha=h\cdot\omega^{-1}$, 且 $0<\alpha<1$) 有关,Shah 和 London (1978 年)总结了 Po 与 α 的经验公式

$$Po=fRe=24(1-1.355\,3\alpha+1.946\,7\alpha^2-1.701\,2\alpha^3+0.956\,4\alpha^4-0.253\,7\alpha^5)\tag{5}$$

本实验 Re 的变化范围为 $10^{-5}\sim10^{-2}$,通道的 $L\cdot D_h^{-1}$ 远大于 60,已达到充分发展,因此利用式(5)计算通道 1 和 2 的 Po ,结果为 23.3、23.7.

对于本实验中的油水两相流,两种流体经过搅拌呈分散状态,因此选用均相模型.在两相流研究中,黏度选用是一个关键问题,由于两相流流动复杂,内部结构不稳定,黏度测量不如单相流准确,因此本实验采用对比法确定黏度.首先利用毛细管黏度计初步测量混合液黏度,测试结果见表 2,再将所测结果与各种两相流黏度模型对比来确定最终黏度值.目前,广泛采用的两相流均相黏度模型如下.

Einstein 黏度模型

$$\mu=\mu_c(1+2.5\varphi_D)\tag{6}$$

Taylor 黏度模型

$$\mu=\mu_c\left(1+2.5\varphi_D\frac{\mu_D/\mu_c+0.4}{\mu_D/\mu_c+1}\right)\tag{7}$$

Dukler 黏度模型

$$\mu=\varphi_o\mu_o+\varphi_w\mu_w\tag{8}$$

Brinkman 黏度模型

$$\mu=\mu_c(1-\varphi_D)^{-2.5}\tag{9}$$

式中: μ 为油水混合液表观黏度; μ_c 为连续相黏度; μ_D 为分散相黏度; μ_o 为油相黏度; μ_w 为水相黏度; φ_D 为分散相体积分数; φ_o 为油相体积分数; φ_w 为水相体积分数.

实验所测黏度与 4 种黏度模型计算值的对比结果见图 4,图中显示实验所测黏度值与 Brinkman 黏度模型计算值相近,随含油率变化趋势相同,因此确定 Brinkman 黏度模型计算的两相流黏度值为最终黏度,见表 2.黏度确定后,只需要将油水混合液的密度和表观黏度替换单相流的密度和黏度即可得到

两相流动的参数.由式(5)可知, Po 只与几何参数有关,所以两个通道中两相流动的 Po 仍为 23.3 和 23.7.

表 2 不同含油率时油水两相混合液物性参数

含油率/ %	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	黏度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	
		实验值	Brinkman 模型
0	1 000	0.001 00	0.001 00
10	980.2	0.001 80	0.001 30
20	961.2	0.001 57	0.001 75
30	943.2	0.002 71	0.002 44
40	920.5	0.005 64	0.003 59
50	901.3	0.007 50	0.005 66
60	880	0.010 20	0.009 88
100	800	0.009 76	0.009 76

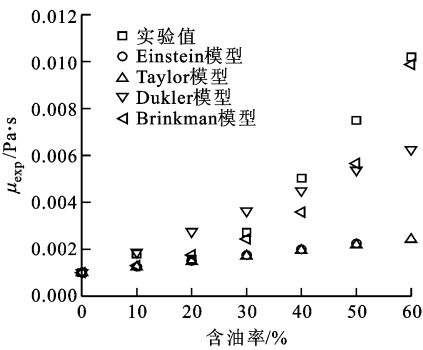


图 4 实验所测黏度与不同黏度模型计算值的对比

3 实验结果与分析

根据实验数据绘制了通道 1、2 不同含油率时摩擦系数 f 随 Re 变化的关系图 5~8. 通道 1、2 特征尺度小,流体流速低, Re 的变化范围仅为 $10^{-5}\sim10^{-2}$,属于低雷诺数流动,两通道的 f 远大于常规管道,但 Po 与常规通道数量级相同,说明实验数据可靠.

图 5、6 分别为通道 1、2 单相油摩擦系数随 Re 变化的关系图,其中通道 1、2 的理论值曲线分别为 $f=23.3Re^{-1}$ 和 $f=23.7Re^{-1}$. 图中两通道的 f 低于理论值,并与 Re 呈线性关系,分别满足如下关系式:通道 1, $Po=fRe=17.2$; 通道 2, $Po=fRe=18.5$. 通道 1 的 Po 实验值 17.2 比理论值 23.3 低 26%. 水力直径较大的通道 2 的 Po 实验值 18.5 比理论值 23.7 低 22%. 这表明通道 1、2 中单相油流

动的 Po 小于常规管道理论预测, 通道尺度越小, 实验值与理论值差异越大.

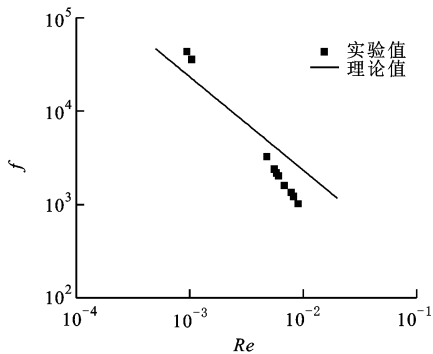


图 5 单相油的摩擦系数随 Re 变化的关系(通道 1)

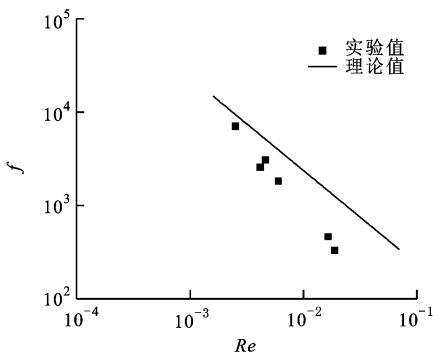


图 6 单相油的摩擦系数随 Re 变化的关系(通道 2)

图 7、8 分别为通道 1、2 不同含油率时油水两相流摩擦系数随 Re 变化的关系图, 理论值曲线分别为 $f=23.3Re^{-1}$ 和 $f=23.7Re^{-1}$. 从图 7、8 中可以看出, 通道 1、2 的摩擦系数随含油率变化的规律相同, 在含油率为 10%、60% 时摩擦系数与理论预测值吻合, 含油率为 20% 时略高于理论值, 含油率为 30%~50% 时不同程度地低于理论值. 实验数据总体集中分布在理论预测线附近, 通道 1、2 的实验值与理论值分别相差 -34%~29%、-37%~31%.

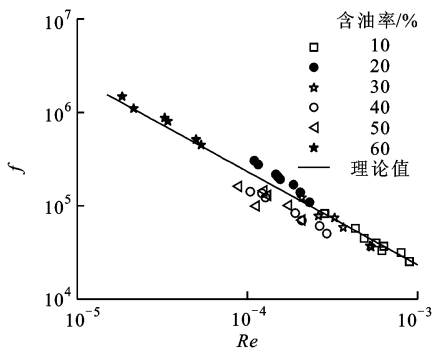


图 7 油水两相流的摩擦系数随 Re 变化的关系(通道 1)

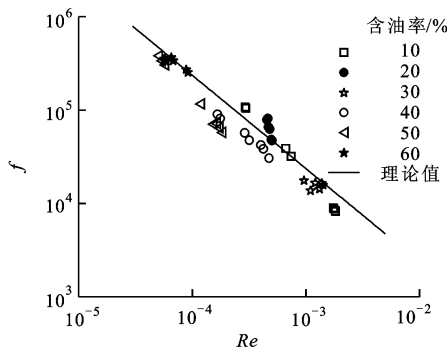


图 8 油水两相流的摩擦系数随 Re 变化的关系(通道 2)

不同含油率的油水两相流摩擦阻力之间的关系可以通过 Po 来体现, 如图 9 所示, Po_{exp} 为相同含油率时不同 Re 下得到的 Po 实验值的加权平均值, Po_{theo} 分别对应通道 1、2 的理论值 23.3 和 23.7. 图中两通道的 Po 与含油率的变化规律相似, 在含油率为 10%、60% 时, $Po_{exp} \cdot Po_{theo}^{-1}$ 约为 1, 含油率为 20% 时约为 1.3, 略高于理论值, 含油率为 30%~50% 时不同程度地低于理论值, 这与摩擦系数随含油率的变化规律相同, 也说明 Po 可以有效反映流体流动的阻力特性.

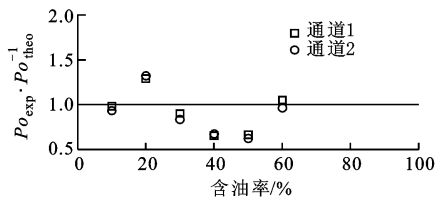


图 9 $Po_{exp} \cdot Po_{theo}^{-1}$ 随含油率变化的关系

综合单相油和油水两相的实验数据发现, 通道 1、2 的 Po 总体随含油率增加而减小, 在含油率为 20% 和 60% 时出现两次跳跃式增加. 究其原因, 主要有 3 方面.

(1) 随着通道尺度减小, 壁面性质对流动阻力的影响越来越大, 甚至不可忽略. 当通道尺寸减小到一定程度, 由于固-液分子力的作用, 在固体壁面处会形成一个流体薄层^[10-12]. 例如实验段通道的亲水性表面, 当水流过该表面时, 水分子与硅原子之间会产生强烈的引力作用, 使得硅片表面形成一个特殊的水薄膜, 在此薄膜内, 硅原子与水分子以及水分子之间会产生强烈的相互作用, 使得该薄层的密度和黏度大于中心流体, 在宏观上表现为流量减小, 阻力增加; 若油通过该壁面时, 壁面的硅原子与油分子会产生排斥作用, 甚至使得油在固-液壁面发生滑移, 流动阻力减小. 当流体工质为油水两相流时, 在壁面处

会形成不连续的油接触表面和水接触表面. 随着含油率增加,与壁面浸润的水相所占比例减小,与壁面接触面积也随之减小;与壁面不浸润的油相所占比例增加,与壁面接触面积增大,宏观上表现为摩擦阻力降低, Po 减小. 这与文献[13]的研究结论相符,但壁面润湿性无法解释含油率为 20%、60%时 Po 跳跃式增加的现象,还有待进一步研究.

(2)通道 1、2 的理论预测基于 N-S 方程连续介质假设和壁面无滑移条件,适用于常规管道. 对于本实验通道,特征尺度小至微米级,可能不再满足连续介质假设,或者满足连续介质假设而不满足壁面无滑移条件.

(3)测量误差. 矩形通道的 Po 也可以表示为

$$Po = \frac{D_h^2}{2\mu} \frac{\Delta P}{Lu} = \frac{2}{\mu} \frac{\Delta P}{Lu} \frac{h^2}{(1+h/w)^2} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出, Po 约与 h 的平方成正比,所以通道高度 h 测量的准确性对 Po 至关重要.

4 结 论

本文采用宽度为 200 μm 、深度分别为 1.8 μm 和 4.1 μm 的两个矩形通道模拟低渗透储层多孔介质孔隙流动,应用数字显微摄像技术和微流体实验技术研究了孔隙通道内单相油和含油率为 10%~60%的油水两相流流动阻力特性,得出以下结论.

(1)对于通道 1、2 中的单相油流动,摩擦系数小于理论值,并与雷诺数呈线性分布,满足关系式:通道 1, $Po = fRe = 17.2$; 通道 2, $Po = fRe = 18.5$, 且两通道的泊肃叶数均小于经典层流理论值,通道尺度越小,泊肃叶数实验值与理论值差异越大.

(2)对于通道 1、2 中不同油水比的两相流流动,两通道的摩擦系数随含油率变化规律相同:在含油率为 10%、60%时摩擦系数与常规理论值吻合,在含油率为 20%时略高于理论值,在含油率为 30%~50%时不同程度地低于理论值. 泊肃叶数总体随含油率增加呈减小趋势,在含油率为 20%与 60%时出现跳跃式增加,分析表明泊肃叶数随含油率变化是受壁面亲水性的影响.

参考文献:

[1] TANAKA M. An industrial and applied review of new MEMS devices features[J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84 (5/6/7/8): 1341-1344.

[2] TSAI N C, SUE C Y. Review of MEMS-based drug delivery and dosing systems[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2007, 134 (2): 555-564.

[3] PENG Xiaofeng, PETERSON G P, WANG B X. Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels [J]. Experimental Heat Transfer, 1994, 7 (5): 249-264.

[4] MALA G M, LI D Q. Flow characteristics of water in microtubes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20 (2): 142-148.

[5] JUDY J, MAYNES D, WEBB B W. Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45 (17): 3477-3489.

[6] JIANG X N, ZHOU Z Y, YAO J, et al. Micro-fluid flow in microchannel[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors Actuators and Euroensors: IX. Stockholm, Sweden: IEEE, 1995: 317-320.

[7] QU W L, MUDAWAR I, LEE S Y, et al. Experimental and computational investigation of flow development and pressure drop in a rectangular micro-channel[J]. Journal of Electronic Packaging, 2006, 128 (1): 1-9.

[8] RODRIGUEZ O M H, OLIEMANS R V A. Experimental study on oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32 (3): 323-343.

[9] XU Xiaoxuan. Study on oil-water two-phase flow in horizontal pipelines[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 59 (1/2): 43-58.

[10] PERTSIN A, GRUNZE M. Water-graphite interaction and behavior of water near the graphite surface [J]. Journal of Physical Chemistry: B, 2004, 108: 1357-1364.

[11] THOMAS J A, MCGAUGHEY A J H. Effect of surface wettability on liquid density, structure, and diffusion near a solid surface[J]. Journal of Chemical Physics, 2007, 126: 1-9.

[12] 王斐, 岳湘安, 王雯靓, 等. 润湿性对模拟原油微尺度流动和渗流的影响[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 302-305.

WANG Fei, YUE Xiang'an, WANG Wenliang, et al. Influence of wettability on micro-scale flow and seepage characteristics of simulated crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 302-305.

[13] CHOI C H, JOHAN K, WESTIN A. Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels [J]. Physics of Fluids, 2003, 15: 2897-2902.

(编辑 荆树蓉)