

原油在微米管束中的非线性流动特征分析¹

高豪泽, 许叶青, 宋付权*

(浙江海洋大学 石化与能源工程学院, 浙江 舟山 316000)

摘要: 近年来, 在世界范围内越来越多致密油气藏投入开发, 致密油藏的储层孔隙主要为微纳米级别, 因此微纳米尺度下流体流动特征对致密油藏开发有着重要作用。本文利用直径为 0.25 μm 和 0.30 μm 的阳极氧化铝膜作为流通通道, 进行单相液体流动实验, 分析流动特征, 为致密油藏中的非线性渗流提供理论基础。实验表明: 黏度越大, 微管半径越小, 原油的流动速度越慢。当压力梯度小于启动压力梯度时, 单相油不流动, 单相油在微纳米管中表现出的黏度大于宏观尺度下的黏度; 压力梯度大于启动压力梯度时, 单相油流动速度随压力梯度增大而增大, 但流动速度远远小于理论预测值。液体边界黏附层占比随着驱替压力梯度的增大而减小, 微管半径越大, 边界黏附层占比越小。

关键词: 微圆管; 微流动; 受限黏度

1 引言

致密油藏、页岩气等储集层多为微纳米级孔道为主, 近年来致密油气藏和页岩油气藏等非常规油气田开发的越来越多^[1-2], 流体在微纳米尺度下的流动规律受到越来越多的重视。在常规的多孔介质中, 已经有了相对成熟的传统连续介质流体力学理论。但微纳米级别的尺度下, 原来的流动规律不再适用。在传统的流体力学中, 流体边界认为无滑移边界条件, 即在固壁处流速为零, 但微纳米尺度下比表面积增大, 流体与固态边界之间存在着很强的相互作用力, 导致流体流动特征区别于传统理论, 即存在滑移边界^[3,4]条件, 或者黏附边界条件(边界附近存在一层不流动的液体)。为此, 科研工作者对微纳米尺度下的流体流动做了大量的研究。

在实验研究方面, Acosta^[5], 李战华等^[6]的研究表明, 在直径大于 20 μm 的微管内, 水的流量依旧同宏观尺度下的传统理论一致。徐绍良等^[7]利用 5 μm 和 2 μm 直径微圆管观察到非线性流动特征, 且管径越小, 非线性流动特征越明显。随着近些年纳米制技术的增长, 微圆管的直径也可制备的更加小。Kannam 等^[8]的实验所用碳管直径可以达到 1nm, 发现滑移长度分布在 1nm~10 μm 的 5 个数量级范围内。

分子模拟同样是研究微纳米流动的一个有效方法。Barrat 等^[9]证明了流体在疏水表面上

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 11472246), 国家重大专项(编号: 2017zx05072005)

存在着明显的速度滑移，黄桥高^[10]发现了滑移长度为避免润湿性的单一函数，曹炳阳^[11]发现滑移和液体与固体表面势能作用有关，根据浸润性不同会表现出正、负滑移和无滑移。

微纳米流动的研究在这些年取得了巨大的进展，但研究采用的流体多为去离子水以及少部分采用乙醇等小分子物质，与实际开发有所不同。致密油藏的储层孔隙集中于 $100\sim 500\text{nm}$ ^[12-15]，流体的组分更为复杂多样。为了研究原油在致密油藏微纳米级孔隙中的渗流行为及拟启动压力梯度的机理，本文以两种不同直径的阳极氧化铝膜中的孔道为流动通道，两种不同黏度的油作为流体介质进行实验。

2 实验装置与流程

本实验采用纳米级阳极氧化铝膜，通过扫描电镜测得其管径为 $0.25\mu\text{m}$ ， $0.3\mu\text{m}$ 。流动介质为 $1.77\text{MPa}\cdot\text{s}$ 和 $15.30\text{Mpa}\cdot\text{s}$ 的高纯度白油。

实验装置分为供压单元和测量单元，如图1所示。压力由氮气瓶提供，高纯氮气经过气体过滤装置、气体缓冲罐到达储液罐，将储液罐中的油往装置的测量单元推进。油在氮气推动下，流经压力温度测量仪后，穿过氧化铝薄膜的亚微米级孔道，最后由末端的流量计测其流量。氧化铝薄膜整体为直径 25mm ，厚度为 $60\mu\text{m}$ ，外围由铝片包裹。

实验主要测量不同压力条件下流过氧化铝膜孔隙的油流量，为控制变量，实验进行时实验室温度保持 21°C 。具体实验流程如下：①将高纯度白油装入储液罐中；②链接装置，接通电源；③利用含支撑砂岩的夹具和密封橡胶圈来固定阳极氧化铝膜外围的铝片；④以纯度为 99.99% 的高纯氮气作为驱动的动力源，对整个实验系统进行驱动，调节压力控制阀；⑤等到系统稳定后，记录不同压力下的白油流量，每个压力记录3组，若3个数据较为接近，取平均值，若数据有较大差别，则说明系统尚未稳定，继续记录；⑥若实验过程中出现阳极氧化铝膜出现破损，放弃所有在这张膜上取得的数据，更换阳极氧化铝膜，重新实验；⑦同种阳极氧化铝膜和黏度重复实验3次。

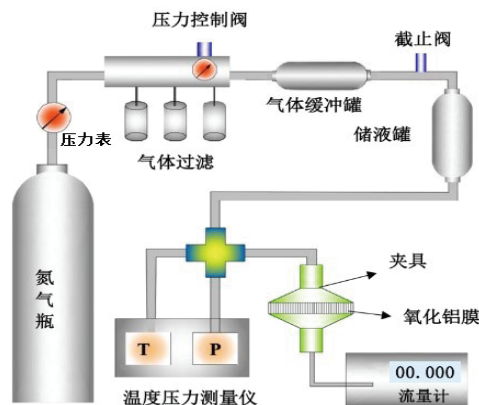


图1 原油在微米通道总流动实验装置示意图

3 实验结果与分析

实验中,选择分别选择黏度为 1.77 和 15mPa·s 的白油,在两种直径的微米管束中流动,最大压差为 1MPa。图 2 为不同黏度下原油在微管中的流动曲线。由图 2 可以发现:在流体和介质等条件不变的情况下,驱动力(压力梯度)越大,流体流动速度越大,且近似于待截距的直线,但流动速度与压力梯度并非成正比,经线性拟合,实验数据线与 x 轴交于一点,该点在石油工程中认为是拟启动压力梯度。根据图 3,相同驱替压力梯度下,微管的直径越大,流体流动速度越快,相同压力梯度下,流体黏度越大,流动速度越慢。

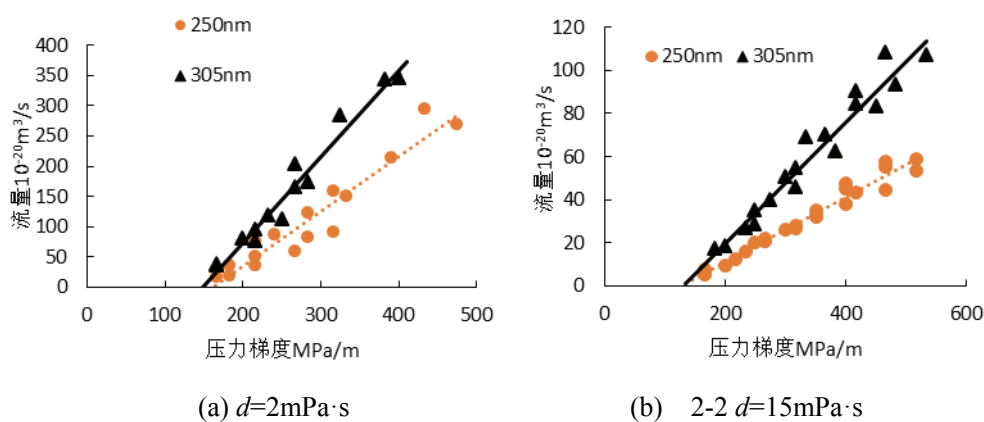


图 2 不同黏度原油在微管中的流量

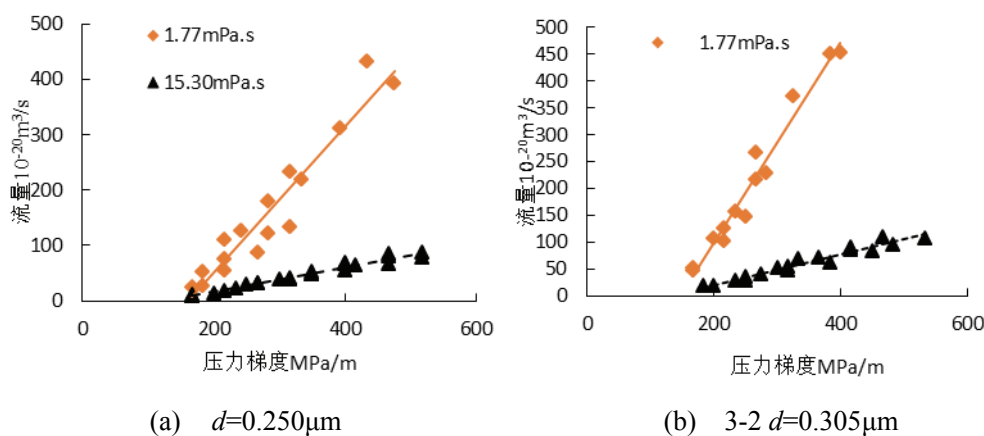


图 3 不同直径的微米通道中原油的流量

在传统流体力学理论中,流体在圆管中的流量理论上用泊肃叶方程来进行描述^[16],

$$q_{hp} = \frac{\pi d^4}{128 \mu_0} \frac{\Delta p}{l} \quad (1)$$

式中： q_{hp} 为硅油的理论体积流量， m^3/s ； μ_0 为硅油的动态黏度， $mPa \cdot s$ ； D 为微管的直径， m ； Δp 为压差， MPa ； l 为微管长度， m 。

图 4 是直径为 $0.25\mu m$ 的微管中实验流量与理论流量的对比图，由图 4 可知：原油的实际流量是远小于理论流量，这是由于在微纳米尺度下，流体和固体边界存在的固液作用力造成的。物理学研究表明：流体在受限空间中会受到固壁边界的强烈作用，从而流体的性质发生改变。在固体壁面附近出现一层不流动的液体层，称之为边界黏附层。

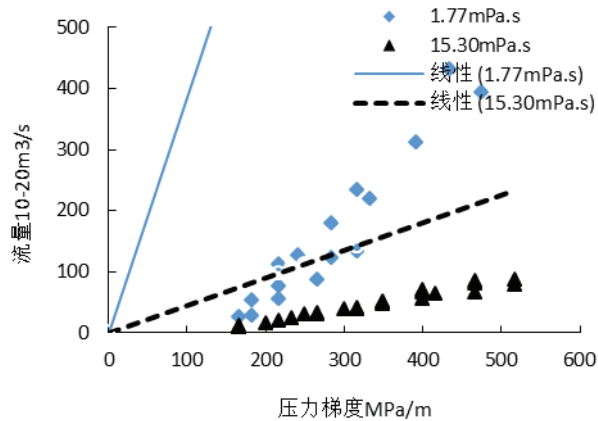


图 4 $d=0.25\mu m$ 通道中理论流量与实验流量

假设边界黏附层厚度为 δ ，定义边界黏附层无量纲厚度 δ_D 为，

$$\delta_D = 2\delta / d \quad (2)$$

式中，边界黏附层厚度为 δ ，用有效孔径 $d-2\delta$ 代替泊肃叶公式中的直径，变形得到 δ 的表达式

$$\delta = \frac{1}{2} \left(d - \left[\frac{128 \cdot \mu_o \cdot Q_{exp}}{N \cdot \pi \cdot \nabla p} \right]^{\frac{1}{4}} \right) \quad (3)$$

根据公式可以得到压力梯度与边界黏附层占比的关系。如图 5 和图 6 所示，为 2 种直径微管通道中边界黏附层占比与驱替压力梯度的拟合曲线。

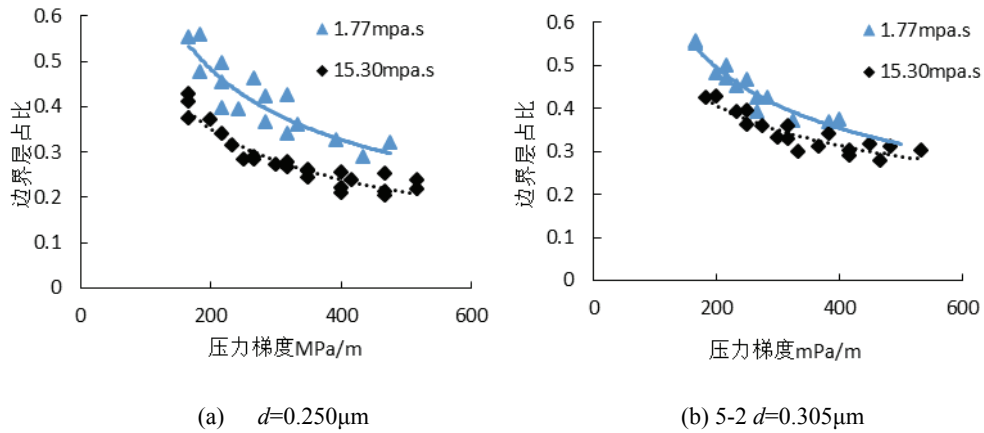


图 5 微管通道中驱替压力梯度与边界黏附层占比

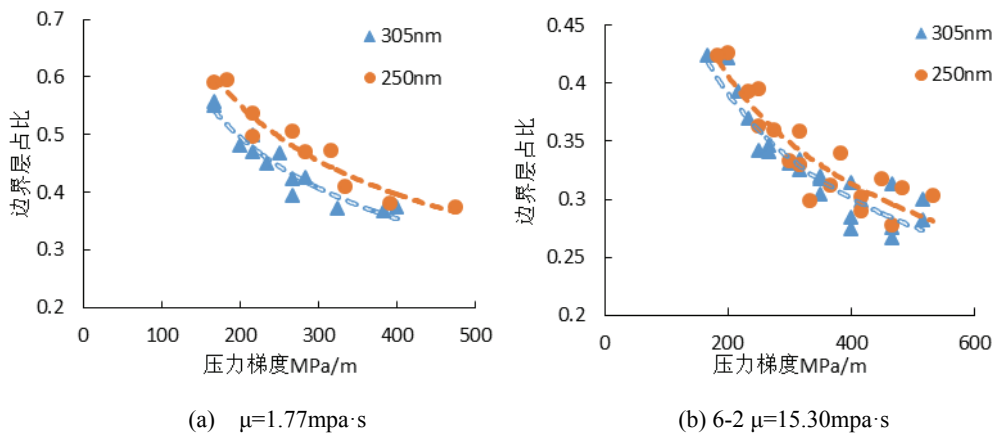


图 6 1.77MPa·s/15.30MPa·s 压力梯度与边界黏附层占比

根据图 5 和图 6 可以发现边界黏附层占比随压力梯度增大而减小。压力梯度越大，流动速度越快，通道内可流动的油就越多，边界黏附层的厚度就越小。相同压力梯度下，管径越大，边界黏附层占比越低，固液作用对流动的影响就越小。

通过上述分析，可以得到微米尺度下流量 q 的表达式

$$q = \frac{\pi(d-2\delta)^4}{128\mu_0} \left(\frac{\Delta p}{l} - G \right) \quad (4)$$

式中， δ 为边界黏附层厚度， G 为拟启动压力梯度，两者都是与流体和介质性质有关的变量。

将图 4 中的趋势线延长，与坐标轴并不交于原点，而是与 x 正半轴交于某一点。可以认为，当压力梯度小于该点时，微管中的原油不流动，当压力大于该点时，微管中的原油

才进行流动，称该点为拟启动压力梯度^[17,18]。

1.77MPa·s 黏度的原油，在直径 0.250 μm 和 0.305 μm 的亚微米管中，启动压力分别为 160MPa 和 147MPa，15.30mPa·s 黏度的原油，在在直径 0.250 μm 和 0.305 μm 的亚微米管中，启动压力分别为 132MPa 和 128MPa。同种流体，微管的直径越大，启动压力梯度越小。

流体在运动过程中，内部分子会产生阻碍其运动的内部摩擦，宏观上表现为流体的黏度。但流体在微纳米通道及固体表面的动力学性质往往会表现得有所不同。

同样采用泊肃叶公式变形，本次实验中的实际黏度为

$$\mu_x = \frac{\pi d^4}{128 q_{\text{exp}}} \frac{\Delta p}{l} \quad (5)$$

实验中流体的实际黏度如表 1 所示

表 1 推导得出的实际流体黏度

微管直径/ μm	宏观黏度/mPa·s	受限黏度/mPa·s
0.250	1.77	5.19
0.250	15.30	31.1
0.305	1.77	6.97
0.305	15.30	45.3

由表 2 可以发现，实验亚微米管中的的流体黏度显著大于宏观条件下的流体黏度。定义黏度的变化比 a 为

$$a_r = \frac{\mu_r}{\mu_0} \quad (6)$$

在直径为 0.250 μm 的亚微米管中，1.77mPa·s 和 15.30mPa·s 的流体黏度比分别为 2.93 和 2.03。在直径为 0.305 μm 的亚微米管中，1.77mPa·s 和 15.30mPa·s 的流体黏度比分别为 3.93 和 2.9。通道直径不变时，流体的宏观黏度越小，黏度的变化越大。

微纳米管中流量可以用受限黏度的方式表述为

$$q = \frac{\pi d^4}{128 a_r \mu_0} \left(\frac{\Delta p}{l} - G \right) \quad (7)$$

式（4）和式（7）是原油在亚微米管道中流动的流量公式，分别从边界黏附层和受限黏度两个方面反应了亚微米管道中流量与传统管流的区别。

4 结论

根据原油在微米管道中流动的实验,对比不同压力梯度,流动管道半径及黏度的原油流量,分析结果,可以得到以下结论。

(1) 实验压力梯度范围内,油的流速与压力梯度近似于待截距的直线,不成正比。流量增长趋势与泊肃叶理论相同,都是呈线性增大趋势,但实验流量明显小于理论流量。

(2) 亚微米级管道中,原油流动存在拟启动压力梯度,且拟启动压力梯度大小跟管道直径和流体黏度有关。

(3) 亚微米级管道中,流通通道存在着边界黏附层,边界黏附层占比随压力梯度增大而减小,且和孔隙的大小和流体的黏度有关。

(4) 亚微米管道中,原油在受限条件下表现出比宏观条件下更大的黏度,黏度越小差异越明显。

参 考 文 献

- 1 邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展对策.石油勘探与开发,2013,40(01):14-26.
- 2 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景,石油勘探与开发,2012,39(02):129-136.
- 3 宋付权,于玲.液体在润湿性微管中流动的边界负滑移特征,水动力学研究与进展 A 辑,2013,28(02):128-134.
- 4 吴承伟,马国军,周平.流体流动的边界滑移问题研究进展[J],力学进展,2008(03):265-282.
- 5 Acosta R E, Muller R H, Tobias C W. Transport processes in narrow (capillary) channels. Aiche journal, 2004, 31(3): 473-482
- 6 李战华,郑旭.微纳米尺度流动实验研究的问题与进展.实验流体力学,2014,28(3):1-11
- 7 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.中国科学,2007,52(1):120-124.
- 8 Kannam S, Todd B, Hansen J. How fast does water flow in carbon nanotubes. J Chem Phys, 2013, 138(9): 094-101.
- 9 Barrat J L, Bocquet L. Large slip effect at a nonwetting fluid solid interface. Physica Review letters, 1999, 82(23): 4671-4674.
- 10 黄桥高,潘光,宋保维.疏水表面滑移流动及减阻特性的格子 Boltzmann 方法模拟.物理学报,2014,63(5):236-242.
- 11 曹炳阳,陈民,过增元.纳米通道内液体流动的滑移现象.物理学报,2006,55(10):5305-5310
- 12 杨正明,赵新礼,熊生春,等.致密油储层孔喉微观结构表征技术研究进展,科技导报,2019,37(05):89-98.
- 13 于俊波,郭殿军,王新强.基于恒速压汞技术的低渗透储层物性特征,大庆石油学院学报,2006(02):22-25+144.
- 14 白斌,朱如凯,吴松涛,等.利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔喉结构.,石油勘探与开发,2013,

40(3):329-333.

15 杨虎, 王建民. 延长气田山西组致密砂岩储层及微观孔喉特征研究, 西安科技大学学报, 2015, 35(6):755-762.

16 宋付权, 田海燕, 张世明, 等. 润湿性微纳米圆管中去离子水的流动特征[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2016, 31(05):615-620.

17 熊伟, 雷群, 刘先贵, 等. 低渗透油藏拟启动压力梯度. 石油勘探与开发, 2009, 36(02): 232-236.

18 郭肖, 伍勇. 启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透气藏水平井产能的影响. 石油与天然气地质, 2007(04): 539-543.

Analysis of nonlinear flow characteristics of crude oil in micron tube bundles

GAO Hao-ze, XU Ye-qing, SONG Fu-quan

(School of Petrochemical and Energetic Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022)

Abstract: In recent years, more and more tight oil and gas reservoirs have been developed worldwide, and the reservoir pores of tight oil reservoirs are mainly at the micro-nano level, so the fluid flow characteristics at the micro-nano scale play an important role in the development of tight oil reservoirs. In this paper, anodic alumina films with diameters of 0.25 micron and 0.30 micron were used as flow channels to conduct single-phase liquid flow experiments and analyze flow characteristics, so as to provide theoretical basis for nonlinear seepage in tight oil reservoirs. The results show that the higher the viscosity, the smaller the radius of micro-tube, and the slower the flow velocity of crude oil. When the pressure gradient is less than the starting pressure gradient, the single-phase oil does not flow, and the viscosity of the single-phase oil in the micro-nanotube is greater than that in the macro-scale. When the pressure gradient is larger than the starting pressure gradient, the flow velocity of single-phase oil increases with the increase of the pressure gradient, but the flow velocity is far less than the theoretical predicted value. The proportion of boundary adhesion layer decreases with the increase of displacement pressure gradient, and the larger the micro-tube radius is, the smaller the proportion of boundary adhesion layer is.

Key words: micro-round tube; micro-flow; limited viscosity