

# Experimental Study on Liquid Flow in Microtubes under Low Velocity Condition

Liang Sun<sup>1</sup>, Pengfei Hao<sup>2\*</sup>, Xiaoqi Wang<sup>1</sup>, Xu Jin<sup>1</sup>, Jianming Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing

<sup>2</sup>School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing

Email: \*haopf@tsinghua.edu.cn

Received: Dec. 8<sup>th</sup>, 2015; accepted: Dec. 26<sup>th</sup>, 2015; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The research on the liquid flow at micro-scale is of great significance to develop low permeability oil/gas reservoirs at high efficiency. In this paper, the flow characteristics of de-ionized water and n-Hexadecane flowing through quartz microtubes with inner diameter of 18.5  $\mu\text{m}$ , 9.6  $\mu\text{m}$  and 4.1  $\mu\text{m}$  were investigated in experiments. The experimental results show that the pressure drop has linear relationship with average velocity of the fluid in the microtubes. The experimental friction factor is consistent with the classical laminar flow theory when the flow velocity ranges in 0.01 mm/s - 1 mm/s, which indicates that the influence of the stationary boundary layer could be neglected when the diameter of the microtube exceeds 4  $\mu\text{m}$ . The nonlinear Darcy phenomenon that the flow resistance increases as the reduction of flow rate and the obvious phenomenon of the starting pressure do not occur for the Newton fluid flow in microtubes.

## Keywords

Microtube, Friction Factor, Newton Fluid, Low Velocity, Start-Up Pressure

---

# 微管道内液体低速流动的实验研究

孙亮<sup>1</sup>, 郝鹏飞<sup>2\*</sup>, 王晓琦<sup>1</sup>, 金旭<sup>1</sup>, 李建明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京

<sup>2</sup>清华大学航天航空学院, 北京

Email: \*haopf@tsinghua.edu.cn

---

\*通讯作者。

收稿日期：2015年12月8日；录用日期：2015年12月26日；发布日期：2015年12月29日

## 摘要

研究微尺度条件下的液体流动规律对于高效开发低渗透油气资源有着重要意义。本文实验研究了低速条件下去离子水和正十六烷在内径分别为 $18.5\ \mu\text{m}$ 、 $9.6\ \mu\text{m}$ 和 $4.1\ \mu\text{m}$ 的石英微圆管内的流动特性。实验结果显示当流速范围在 $0.01\ \text{mm/s}\sim 1\ \text{mm/s}$ 时，微管道内的液体压降与平均流速呈线性关系，微圆管内的实际流动阻力与经典流体力学的层流流动理论基本吻合，该结果说明对于直径大于 $4\ \mu\text{m}$ 的微管道内的牛顿流体流动，固壁不动边界层的影响可以忽略，并没有出现流动阻力随着流速降低而减小的达西非线性现象以及明显的启动压力现象。

## 关键词

微管道，阻力系数，牛顿流体，低速，启动压力

## 1. 引言

随着中高渗透油气资源的逐渐枯竭，以及日益增长的油气需求，低渗透油气资源将成为油气开采的主要方向。低渗透油藏由于渗透率低，孔隙喉道细小，渗流环境复杂，流体在多孔介质中的流动特征和机理受到流体性质、多孔介质性质以及二者之间相互作用等因素的影响和控制，因而油水渗流的特点及规律要比中高渗透储层复杂得多[1]。实际低渗透油藏中，由于孔隙半径和边界层厚度几乎在同一数量级上或者更小，再加上多孔介质以及粘土的影响，这种固-液边界层的影响会大大增强，边界流体占孔隙系统中流体的比例增大，边界层对渗流的影响已经不容忽视，甚至会使渗流偏离达西渗流规律，呈现非线性特性并存在启动压力，即只有当驱动压力梯度大于某孔道的启动压力梯度时，该孔道中的流体才开始流动。尽管大量的室内模拟实验与矿场实验对以上流动特性做出了很好的证明，但目前研究者对油藏启动压力的存在性和产生机理还存在争论[2]。大部分学者认为，低孔隙度、低渗透率油气藏存在启动压力梯度，启动压力大小与渗透率相关[3]。少数学者认为启动压力不存在的观点是认为之所以在一定压力梯度时才有流量，主要原因是实验稳定时间不足、储层伤害表皮效应以及毛管力所致[4]。

由于储层岩石结构复杂，为了研究微细孔道内的液体流动特性，很多学者利用毛细管或微管道来模拟储层缝隙中的流动。宋付权[5]以 Hagen-Poiseuille 定理为基础，通过对比分析了低渗透多孔介质和微管中液体流动的规律，并预测了微管中液体流动出现微尺度效应的尺度约为 1 微米，但未得到实验验证。李洋[6]通过实验研究了去离子水在半径为  $2.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$  微管中的流速和流量特征，研究结果表明：微管中流体的低速流动具有非线性特征，且随着微管半径的减小，流动的非线性程度增强。徐绍良[7]研究了去离子水在内径为  $2\ \mu\text{m}$  和  $5\ \mu\text{m}$  微圆管中的流动特性，得到了去离子水在微圆管中边界层流体厚度随压力梯度的变化曲线，发现随着压力梯度的增加，边界层流体厚度呈指数衰减趋势。但是，另外一些研究者实验结果却表明液体在微尺度下的流动规律依然符合宏观尺度下的 Poiseuille 定律。江小宁[8]用水在直径为  $8\sim 42\ \mu\text{m}$ ，管长为  $1\sim 10\ \text{cm}$  的微管中进行实验，实验结果与理论计算吻合，流动符合宏观流动规律。流动规律仍符合连续介质假设的经典流体力学模型。

目前测量微管道中启动压力的方法主要有“压差-流量法”及“毛细管平衡法”，前者是通过压差-流量曲线的外推得到启动压力，测量精度受到影响，且外推方法的理论基础存在问题；后者虽然能够测量得到启动压力，但是测量时间要求很长，而且无法得到流量与压差之间的变化规律。需要指出的是，以上两种方法测量的结果存在差异，其原因是利用流量法测量启动压力时通常采用氮气瓶等高压气源，驱动压

力比较大,很难精确测量低速流动的压降。目前关于微管道中低雷诺数( $Re < 0.01$ )下流动阻力特性的研究成果还很少。本研究通过改进微尺度流动实验方法,通过测量不同直径微管道中去离子水及正十六烷的流动阻力特性,研究了低雷诺数下微管道中的液体流动特性,讨论了尺度效应对流动阻力及启动压力的影响。

## 2. 实验装置及方法

当微管道中的液体流动速度很低时,压降会很小,为了提高低流速条件下的流速和压降测量精度,我们在实验中用量筒代替原有的空气压缩机,其优点是在低压条件下既能提供稳定的压力源又可以精确测量微管道进出口的压差,我们先把待测液体注入到微管道和量筒中,利用量筒与微管道的液面差驱动流体运动,由于二者的液面差可以接近于零,因此可以测量低压驱动条件下流体的阻力特性。实验装置如图 1 所示。量筒中的流体在重力作用下经过毛细玻璃管流入待测微管道,然后流进出口毛细管,通过利用显微镜和 CCD 测量一段时间内毛细管中的液面位移来计算微管道中流体的体积流量。由于和待测微管道连接的毛细玻璃管的直径比待测微管道本身大 1~2 个量级,所以连接毛细管的压力损失可以忽略不计。实验中液位差的测量度为 0.5 mm,对应的压力测量精度为 5 Pa,高于普通压力传感器的测量精度。整个测量至于显微镜的载物台上,采用高倍数物镜和高分辨率 CCD,液面的位移精度最高可以达到 0.18  $\mu\text{m}$ ,时间计量精度为 0.1 s。本文采用的测试微管道是美国 Polymicro 公司生产的熔融毛细玻璃管,标称直径分别为 20.0  $\mu\text{m}$ 、10.0  $\mu\text{m}$  和 5.0  $\mu\text{m}$ ,利用扫描电镜实际测量的直径分别为 18.5  $\mu\text{m}$ 、9.6  $\mu\text{m}$  和 4.1  $\mu\text{m}$ 。实验介质分别采用去离子水和正十六烷,并在实验前经过 0.22  $\mu\text{m}$  微孔滤膜进行过滤。

## 3. 实验结果及分析

### 3.1. 实验结果

实验研究了室温条件下(25 $^{\circ}\text{C}$ )去离子水及正十六烷在直径分别为 18.5  $\mu\text{m}$ 、9.6  $\mu\text{m}$  和 4.1  $\mu\text{m}$  的微圆管中的流动阻力特征。从图 2~图 4 的实验结果可以看出 3 种尺寸的微管中去离子水及十六烷的平均流速与压力梯度基本呈线性关系,在压力梯度很低( $<0.1 \text{ MPa/m}$ )的情况下,对于三种微管道并没有出现明显的非线性流动特征,而且流速与压降的关系曲线基本通过原点,说明对于直径大于 4 微米的长直微管道,启动压力可以忽略不计。该实验结果与以往的实验结果[6] [7]有所差异,以往的实验中微管道中流体的驱动压力比较高,在低流速情况下测量点较少,测量误差较大。本实验中改进了测量方法,着重研究低流速( $U < 1 \text{ mm/s}$ )条件下的微管道中的流动阻力,实验结果显示当流速范围在 0.01  $\text{mm/s}$ ~1  $\text{mm/s}$  之内时,微管道内的流动阻力特性并未出现明显的非线性特征。

### 3.2. 讨论与分析

为了将实验结果与经典流体力学理论相比较,我们引入 Darcy 阻力系数  $f$ ,得到压力梯度与平均速度  $U$  的关系:

$$\frac{\Delta P}{L} = f \frac{\rho U^2}{D} \quad (1)$$

$$f = \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{\pi^2 D^5}{8Q_v} \quad (2)$$

利用(2)式根据实验测得的压降及平均速度可以得到阻力系数  $f$ ,根据圆管层流的 Hagen-Poiseuille 定律可以得到

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

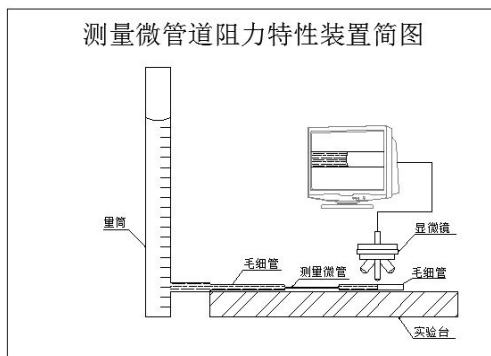


Figure 1. Experimental setup

图 1. 实验装置

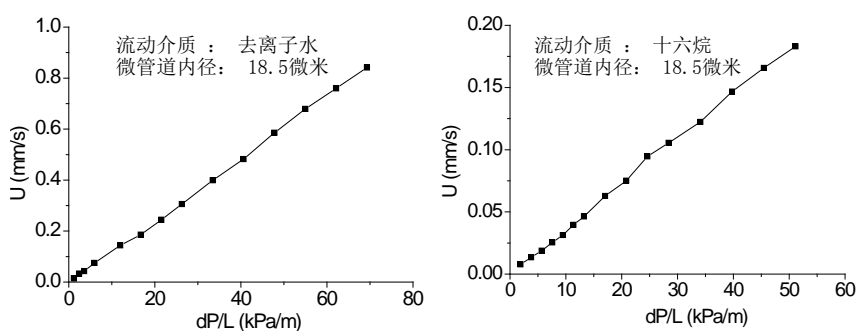


Figure 2. Relationship between pressure gradient and flow rate ( $D = 18.5 \mu\text{m}$ )

图 2. 直径 18.5 μm 微圆管中压力梯度与流量的关系

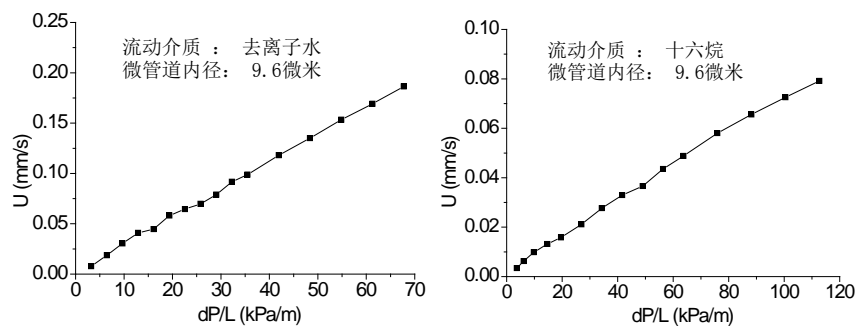


Figure 3. Relationship between pressure gradient and flow rate ( $D = 9.6 \mu\text{m}$ )

图 3. 直径 9.6 μm 微圆管中压力梯度与流量的关系

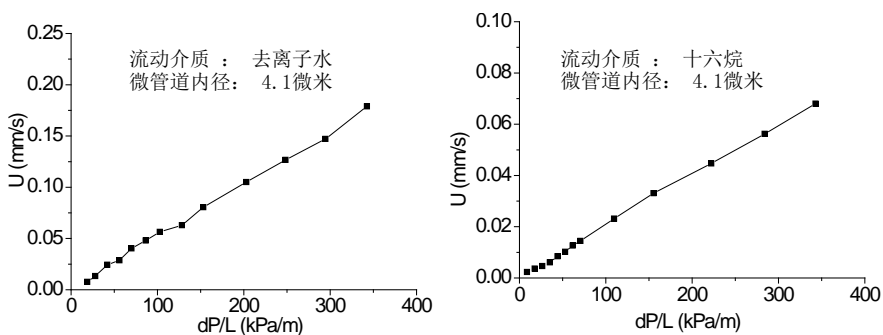


Figure 4. Relationship between pressure gradient and flow rate ( $D = 9.6 \mu\text{m}$ )

图 4. 直径 9.6 μm 微圆管中压力梯度与流量的关系

这里

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (4)$$

我们定义无量纲阻力系数比(微圆管的实际流动阻力与经典流体力学的理论流动阻力之比)为:

$$C^* = \frac{f_{\text{exp}}}{f} \quad (5)$$

图 5~图 7 给出了不同尺度微管道内的液体流动阻力系数与理论值的比较。实验结果显示, 在雷诺数

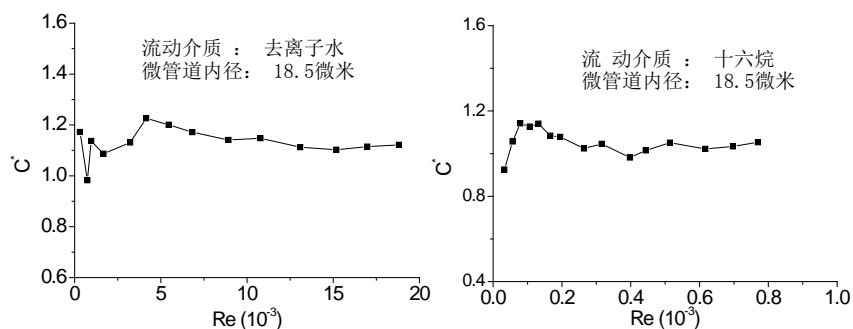


Figure 5. Relationship between dimensionless friction factor and Reynolds number ( $D = 18.5 \mu\text{m}$ )

图 5. 直径 18.5  $\mu\text{m}$  无量纲阻力系数比与雷诺数的关系

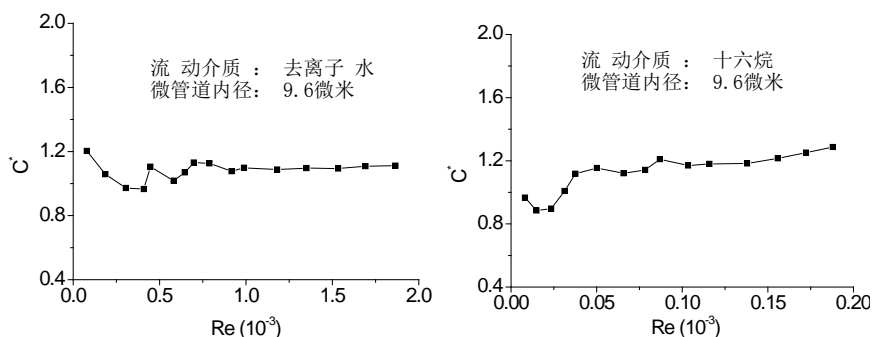


Figure 6. Relationship between dimensionless friction factor and Reynolds number ( $D = 9.6 \mu\text{m}$ )

图 6. 直径 9.6  $\mu\text{m}$  无量纲阻力系数比与雷诺数的关系

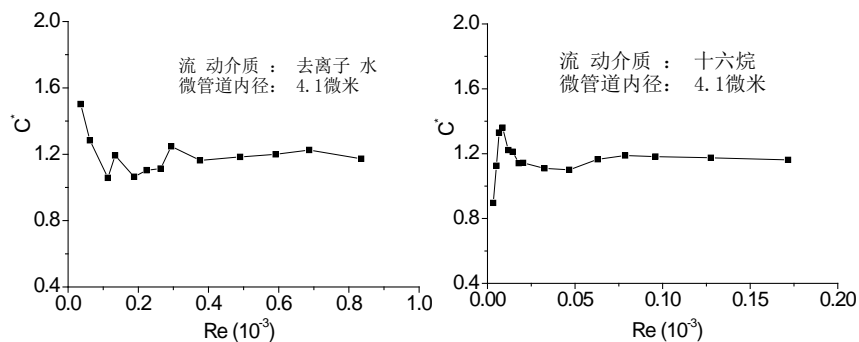


Figure 7. Relationship between dimensionless friction factor and Reynolds number ( $D = 4.1 \mu\text{m}$ )

图 7. 直径 4.1  $\mu\text{m}$  无量纲阻力系数比与雷诺数的关系

很小的情况下  $Re < 0.001$ ，微圆管内的实际流动阻力与经典流体力学的流动阻力基本吻合。该结果一方面说明低雷诺数时的微管道内的流动阻力规律仍然符合牛顿流体的层流理论公式，另一方面说明对于直径大于  $4\ \mu\text{m}$  的微管道，流动压降与管内的平均流速成正比，并没有出现流动阻力随着流速降低而减小的达西非线性现象以及明显的启动压力现象，这与以前的一些实验结果存在差异，其原因可能是由于以前的实验都是基于中压或高压下的实验结果，而且多种因素(如测量系统中的气泡等)引起的微流道阻塞会导致流动阻力增加或产生启动压力，另外流量、压力及微管道的尺度测量带来的误差都会对实验结果产生影响。一些学者提出达西非线性流动现象及启动压力与紧贴着固相表面的不动液体层(边界层，需要指出的是这里定义的边界层与经典流体力学中的边界层(boundary Layer)是两个不同的概念)有关[2]。但 H. K. Chistenson 等[9]的实验结果显示，但对于纯水这样的简单牛顿流体，不动层厚度仅为 1~2 个水分子层大小，符合正常的粘滞性流动规律；将水换为十四烷的实验亦得到类似结果。我们的实验结果直接证明了对于牛顿流体，在微米尺度的缝隙中并不存在“不动边界层”及启动压力，其阻力特性仍然满足达西线性流动规律。

另外对于已有关于非线性流动特性的实验结果[10]，除了为孔隙的尺度效应外，还存在其他因素导致流体在低速条件下偏离线性规律，如岩心内部复杂的微纳米通道拓扑结构，压力不同导致的岩心孔隙面积变化、原油的非牛顿流体特性、流体与固壁之间的复杂相互作用以及岩心内部滞留气体的影响，关于低渗透储层中非线性流动特性的微观机理还有待于进一步深入研究。

#### 4. 结论

石油储层微孔道内的流动机理与流动特性研究对探索致密油藏运移机理和提高低渗透油田原油采收率具有十分重要的意义。但目前关于石油在微纳米尺度孔道内及缝隙内的流动状态、流动机理及流动规律尚十分不清楚，关于低渗透储层内流动呈现达西非线性特性并存在启动压力的原因及机理还存在不同的观点。本论文通过改进微尺度流动实验方法，通过测量低速条件下不同直径微管道中去离子水及正十六烷的流动阻力特性，研究了低雷诺数下微管道中的液体流动特性，讨论了尺度效应对流动阻力及启动压力的影响。

微管道内的流量压降实验结果显示，对于内径大于 4 微米的微圆管内的牛顿流体，在雷诺数很小的情况下( $Re < 0.001$ )，微圆管内的实际流动阻力与经典流体力学的流动阻力基本吻合，流动压降与管内的平均流速成线性关系，并没有出现流动阻力系数随着流速降低而增加的达西非线性现象以及明显的启动压力现象，说明微米量级的微管道的尺度效应对牛顿流体的流动阻力规律没有明显影响，而其他因素如岩心内部复杂的微纳米通道拓扑结构、复杂流体的非牛顿特性以及流体与固壁之间的复杂相互作用等因素对低渗透储层中流动特性的影响还有待进一步深入研究。

#### 基金项目

中石油创新基金“石油在微纳米孔道中的流动特性研究”(编号：2014D-5006-0208)。

#### 参考文献 (References)

- [1] Elkewidy, T.I. (2012) Integrated Evaluation of Formation Damage/Remediation Potential of Low Permeability Reservoirs. *SPE*, 2012, Article ID: 163310.
- [2] 郑力会等. 油藏启动压力研究基础理论问题探讨[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(5): 121-125.
- [3] 窦宏恩. 质疑不存在启动压力之观点[J]. 特种油气藏, 2009, 16(1): 53-57.
- [4] 李传亮. 启动压力梯度真的存在吗?[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 867-870.
- [5] 宋付权, 陈晓星. 液体壁面滑移的分子动力学研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(1): 80-86.



- 
- [6] 李洋, 微尺度下非线性流动特征及降低流动阻力的研究[D]: [博士学位]. 北京: 中国科学院, 2010.
- [7] 徐绍良, 岳湘安. 低速非线性流动特性的实验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(5): 60-63.
- [8] 李勇, 江小宁, 周兆英. 微管道流体的流动特性[J]. 中国机械工程, 1994, 5(3): 24-25.
- [9] Chistenson, H.K., Israelachvili, J.N. and Rashley, R.M. (1987) Properties of Capillary Fluid at the Microscopic Level. *SPERE*, **2**, 155-165. <http://dx.doi.org/10.2118/14698-PA>
- [10] 徐运亭, 徐启, 郭永贵, 等. 低渗透油藏渗流机理研究及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 48-54.