不同极性牛顿流体的微尺度流动

吴九柱*, 程林松, 李春兰, 曹仁义, 陈长超, 徐中一

中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

* 联系人, E-mail: 2015312032@student.cup.edu.cn

2016-10-20 收稿, 2017-01-22 修回, 2017-01-23 接受, 2017-03-29 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2015CB250902)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130007120014)和国家自然科学基金(51574258, 51674273)资助

摘要 极性是影响流体微尺度流动的重要因素. 本文研究了去离子水(强极性, 极性10.2)和异丙醇(中等极性, 极性4)在0.04~24.8 MPa/m, 半径7.5, 5, 2.5, 1 μm 微管中的流动规律. 结果表明, 微尺度下流体流动不再遵循泊肃叶定律, 流速偏低, 且表现出非线性特征. 随着压力梯度升高, 边界层厚度不断减小, 造成有效流动半径不断增大, 导致了流动的非线性. 当压力梯度升高到一定程度, 边界层厚度稳定, 非线性流过渡为线性流. 流体极性越强, 流固相互作用对流动影响越大, 消除黏度影响后, 去离子水的边界层厚度大于异丙醇, 非线性流动的压力梯度上限低于异丙醇.

关键词 微尺度, 微圆管, 非线性, 分子极性, 边界层厚度

随着微机电系统、生物学的发展, 以及致密油藏等以微纳米孔为主的非常规油气田的开发, 流体在微尺度下流动规律及其影响因素受到各领域学者越来越多的关注^[1,2].

在固液接触面, 流固分子间存在氢键、范德华力等短程相互作用力^[3]. 宏观尺度下, 这些力对流动的影响很小, 但随着尺度减小, 流动空间的表体比急剧增加, 流固相互作用对流动的影响不可忽略. 大量实验、理论研究表明, 流体在微尺度下的流动规律不同于宏观尺度^[1,2,4~8].

1990年, Pfahler等人^[4]发现异丙醇在截面100 $\mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ 硅槽中流动的阻力系数大于理论值. Mala和Li^[5]也证实直径50 μm 的石英和不锈钢微管中水的流速低于理论值, 并且用考虑双电层效应的数学模型进行了验证^[6].

在石油储层中, 由于流体成分、孔隙结构复杂, 流动也更加复杂. 马尔哈辛^[9]认为, 由于极性物质的

存在, 石油在多孔介质中的流动存在边界层. 黄延章^[10]应用核磁共振技术证实了边界层的存在, 并且指出边界层流体不是绝对不流动, 只要方法得当仍可使其流动. Cui等人^[7]发现去离子水、四氯化碳在直径3~10 μm 圆管中的阻力系数与理论值之比不恒为1, 而是随压力升高而增加. 岳湘安等人^[8]发现聚合物HPAM溶液在内径100 μm 以下微管中的流速明显高于理论值.

流体极性对微尺度流动影响较大, 但目前针对极性对微尺度流动影响的研究较少. 同时, 现有研究的压力梯度集中在1~80 MPa/m, 而微尺度流动在高、低压力梯度下的规律有可能不同. 油田开发过程中, 地层流体收到的压力梯度不超过1 MPa/m, 所以低压力梯度下的微尺度流动研究对油田开发更有意义.

本文建立了微尺度流动温度、压力、流量的测量装置, 重点研究了0.04~24.8 MPa/m去离子水(极性

引用格式: 吴九柱, 程林松, 李春兰, 等. 不同极性牛顿流体的微尺度流动. 科学通报, 2017, 62: 2988–2996

Wu J Z, Cheng L S, Li C L, et al. Flow of Newtonian fluids with different polarity in micro scale (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2988–2996, doi: 10.1360/N972016-01171

10.2)、异丙醇(极性4)的微尺度流动. 分析了流速、边界层厚度特征, 研究了压力、微管半径对流动特征的影响, 解释了非线性流动产生的原因.

1 实验方法

1.1 装置与流程

实验装置如图1所示, 包括供压单元、流动单元和测量单元3部分. 实验过程中, 氮气供压, 通过调节调压阀获得所需压力. 气压通过中间容器的活塞驱动实验流体. 流动开始后, 计量管中气液界面移动. 显微镜摄像头为不同时刻的界面拍照, 同时记录相应的时间, 以求出计量管内流体流速, 进而换算出实验管中的流速. 测量管中气液界面位移的测量方法如图2所示. 压力传感器记录实时压力. 本文实验参数如表1所示, 其中 r 为实验管半径, μm ; r_{M} 为计量管半径, μm ; L 为实验管长度, m ; p 为压力, kPa ; ∇p 为压力梯度, MPa/m .

1.2 实验材料

微圆管由熔融石英制成, 内壁可视为水力光滑管^[7]. 微圆管实际管径与公称管径存在偏差, 需要校正. 使用日立SU8010扫描电子显微镜扫描微圆管端面并测量, 方法如图3所示, 公称半径为7.5, 5, 2.5, 1 μm 的微圆管的实际半径分别为7.631, 4.805, 2.374, 1.377 μm . 为叙述方便, 下文仍使用公称半径.

实验流体经抽真空、过滤后进入流动单元, 确保纯净. 异丙醇纯度99.7%, 去离子水与壁面的润湿角

图1 (网络版彩色)实验装置图. 1, 氮气罐; 2, 压力表; 3, 不同量程的调压阀; 4, 通大气开关; 5, 带活塞中间容器; 6, 液体过滤器; 7, 三通; 8, 实验微管; 9, 连接微管; 10, 计量微管; 11, 压力传感器; 12, 显微镜摄像头

Figure 1 (Color online) Sketch of experimental device. 1, Nitrogen container; 2, pressure sensor; 3, pressure regulating valves with different ranges; 4, valve connected to atmosphere; 5, intermediate container with piston inside; 6, filter; 7, tee joint; 8, experimental tube; 9, connection tube; 10, metering tube; 11, pressure sensor; 12, CCD microscope camera

图2 (网络版彩色)测量管中气液界面位移

Figure 2 (Color online) Measurement of displacement of liquid-air interface in metering tube

为 $50^\circ \pm 3^\circ$, 异丙醇为 $40^\circ \pm 2^\circ$. 本研究中, 润湿角受管径、压差影响可以忽略. 流体黏温曲线如图4所示.

表1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

$r(\mu\text{m})$	$r_{\text{M}}(\mu\text{m})$	$L(\text{cm})$	$p(\text{kPa})$	$\nabla p(\text{MPa/m})$	流体
7.5	230	0.2583	11.26~220.86	0.04~0.86	去离子水
7.5	230	0.2040	24.68~219.61	0.12~1.08	异丙醇
5	75	0.2475	8.93~158.40	0.036~0.64	去离子水
5	230	0.3015	43.80~311.60	0.14~1.03	异丙醇
2.5	37.5	0.4909	78.86~1789.96	0.16~3.65	去离子水
2.5	230	0.0804	110.76~443.21	2.60~4.94	异丙醇
1	25	0.1523	53.11~2435.19	0.35~15.98	去离子水
1	75	0.0380	70.70~942.70	1.86~24.81	异丙醇

图3 (网络版彩色)半径的校正。(a)微圆管端面SEM成像;(b)微圆管内径测量

Figure 3 (Color online) Calibration of the radius. (a) SEM image of cross section of microtube; (b) measurement of inner radius of microtube

图4 (网络版彩色)实验流体黏度温度曲线

Figure 4 (Color online) Viscosity-temperature curve of working fluids

1.3 误差计算

实验的不确定度由无量纲阻力系数估计得到, 定义

$$C^* = \frac{v_{hp}}{v_{exp}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, C^* 为无量纲阻力系数; v 表示流速, mm/s.

实验误差来自内径测量、微圆管长度测量、位移测量、黏度变化、时间测量和管路连接造成的压力损失. 总的不确定度为

$$\frac{u_{C^*}}{C^*} = \pm \sqrt{\left(\frac{u_{\mu}}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{u_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{u_{r_{MT}}}{r_{MT}}\right)^2 + \left(\frac{u_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{u_{\nabla p}}{\nabla p}\right)^2 + \left(\frac{u_l}{l}\right)^2}, \quad (2)$$

其中, u 为相对误差, %; μ 为黏度, mPa·s; l 为位移, mm; t 为时间, s.

半径和位移测量的绝对误差为一个像素; 微管长度测量绝对误差为1 mm; 管路压力损失如图5所示, 应用下式进行计算:

$$\Delta p_i = f_i \frac{(v_1 - v_2)^2}{2} \rho, \quad (3)$$

其中, f 为水头损失系数, 无量纲; ρ 为密度, g/cm³.

2 实验结果与分析

2.1 流动的非线性特征

理论流速通过泊肃叶方程计算

$$v_{hp} = \frac{r^2}{8\mu} \nabla p. \quad (4)$$

实际流速通过计量管中的流速换算得到

$$v_{exp} = v_M (r_M/r)^2, \quad (5)$$

其中

$$v_M = l/t. \quad (6)$$

图6是流速随压力梯度的变化. 可以看出, 在 $r=7.5, 5, 2.5, 1 \mu\text{m}$ 的微管中, 去离子水和异丙醇的真实流速均低于泊肃叶方程的计算值. 微米级尺度下, 泊肃叶方程不再适用. 半径越小, 真实流速与理论值的差异越大, 说明半径越小, 流固相互作用对微尺度流动影响越大.

根据泊肃叶定律, 圆管中压力驱动流动的流量随压力梯度线性变化, 设为

$$v_{hp} = k_1 \times \nabla p. \quad (7)$$

若实际流动也为线性, 设为

$$v_{exp} = k_2 \times \nabla p. \quad (8)$$

定义速度偏移率

图5 (网络版彩色)压力损失示意图

Figure 5 (Color online) Sketch of the pressure loss

图6 (网络版彩色)速度随压力梯度变化。(a) $r=7.5\ \mu\text{m}$; (b) $r=5\ \mu\text{m}$; (c) $r=2.5\ \mu\text{m}$; (d) $r=1\ \mu\text{m}$

Figure 6 (Color online) Relationship of flow rate and pressure gradient. (a) $r=7.5\ \mu\text{m}$; (b) $r=5\ \mu\text{m}$; (c) $r=2.5\ \mu\text{m}$; (d) $r=1\ \mu\text{m}$

$$D = \frac{v_{hp} - v_{exp}}{v_{hp}} \times 100\%, \quad (9)$$

其中, D 为速度偏移率, 无量纲。由于 k_1 , k_2 均为常数, 化简为

$$D = \left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right) \times 100\%, \quad (10)$$

所以, 如果实际流动为线性, D 必为常数; 若 D 不为常数, 则实际流动为非线性, 且速度偏移率变化越大, 说明非线性越强。

图7是速度偏移率随压力梯度的变化。可以看出, 在8组实验中, 速度偏移率均随压力梯度升高而减小, 最终趋于定值。图中速度偏移率均不为常数, 4组实验中的流动均具有非线性, 随着压力梯度升高, 速度偏移率最终为定值, 非线性流最终转化为线性流。对于相同的流体, 半径越小, 非线性流动上限越高。异丙醇在 $r=7.5, 5, 2.5, 1\ \mu\text{m}$ 微管中的非线性流动上限分别为 0.691, 0.6, 3.36, 11 MPa/m; 去离子水为 0.353, 0.48, 1.71, 9.1 MPa/m。在相同半径的微管中, 去离子水的非线性流动上限低于异丙醇。

2.2 不同极性流体分子的边界层厚度

根据马尔哈辛^[9]、黄延章^[10]、徐运亭等人^[11]的流

体中的极性物质与固壁相互作用, 在近壁处形成高黏度高密度的边界层流体。徐绍良等人^[12]也认为在界面张力作用下, 流固界面附近形成一个吸附滞留层, 即边界层。边界层厚度计算公式为^[12]

$$h = r - \sqrt{\frac{8\mu Lv_{exp}}{p}}, \quad (11)$$

其中, h 为边界层厚度, μm 。

图8是边界层厚度占半径比例与压力梯度的关系。随着压力梯度升高, 边界层厚度减小, 有效流动半径不断扩大。所以通过提高驱动压差可以提高微圆管中的可动流体饱和度。由于流速与压力梯度是线性关系, 与半径是非线性关系, 所以当半径随压力梯度变化, 流动表现出非线性特征。对比图8(a)和(b)可以看出, 半径越小, 边界层厚度越小, 但是占据流动空间的比例更大。可见尺度越小, 边界层对流动的影响越大。

在某一压力梯度下, 若边界层厚度为定值, 泊肃叶方程可以修正为

$$v_{hp} = \frac{(r-h)^2}{8\mu} \nabla p. \quad (12)$$

如果边界层厚度不随压力梯度变化, 速度将随

图 7 (网络版彩色)速度偏移率随压力梯度变化. (a) $r=7.5 \mu\text{m}$; (b) $r=5 \mu\text{m}$; (c) $r=2.5 \mu\text{m}$; (d) $r=1 \mu\text{m}$

Figure 7 (Color online) Relationship of flow rate deviation ratio and pressure gradient. (a) $r=7.5 \mu\text{m}$; (b) $r=5 \mu\text{m}$; (c) $r=2.5 \mu\text{m}$; (d) $r=1 \mu\text{m}$

图 8 (网络版彩色)边界层厚度占比与压力梯度关系. (a) $r=7.5 \mu\text{m}$; (b) $r=5 \mu\text{m}$; (c) $r=2.5 \mu\text{m}$; (d) $r=1 \mu\text{m}$

Figure 8 (Color online) Ratio of thickness of boundary layer to radius. (a) $r=7.5 \mu\text{m}$; (b) $r=5 \mu\text{m}$; (c) $r=2.5 \mu\text{m}$; (d) $r=1 \mu\text{m}$

压力梯度线性升高. 但根据实验结果, 边界层厚度与压力梯度成幂函数关系

$$h = a(\nabla p)^b, \quad (13)$$

其中 a, b 为常数, 无量纲, 且 $a > 0, b < 0$. 拟合结果见表2. 根据表2和公式(12)和(13)可知, 速度随压力梯度非线性升高. 以 $r = 1 \mu\text{m}$ 圆管为例, 流速的理论值、实验值和修正泊肃叶公式计算结果如图9所示.

徐运亭等人^[11]和李中锋等人^[13]研究发现相同流体的黏度越高, 边界层厚度越大. 李洋等人^[14]和田虢丰^[15]研究认为边界层厚度与黏度近似成线性关系. 为消除黏度对边界层厚度的影响, 对比极性对流动的影响, 采用下式修正边界层厚度:

$$h_c = \frac{h}{\mu}, \quad (14)$$

其中, h_c 为修正的边界层厚度, $\mu\text{m}/\text{mPa} \cdot \text{s}$.

图10是修正边界层厚度与压力梯度的关系. 可以看出, 修正边界层厚度随着压力梯度升高而减小, 最终保持恒定值. 半径相同时, 强极性的去离子水的边界层厚度大于异丙醇, 说明极性越强, 边界层厚度越大. 这与马尔哈辛的研究结论^[9]相一致. 马尔哈辛研究表明极性物质与固壁的相互吸引形成了边界层, 极性物质浓度越高、极性越强, 边界层越厚. 本研究采用的微圆管材料为熔融 SiO_2 , 壁面处裸露的 Si 原子、 O 原子分别与水中的 OH^- , H^+ 结合形成羟基, 羟基通过范德华力与水分子形成氢键, 将水分子束缚在壁面附近, 形成边界层^[14-16]. 异丙醇极性弱, 氧原子电性不强, 与壁面相互作用较弱, 因此边界层厚度较小.

表2 边界层厚度拟合结果

Table 2 Fitting result of thickness of boundary layer

$r(\mu\text{m})$	a	b	流体
7.5	0.1284	-0.344	去离子水
7.5	0.3748	-0.403	异丙醇
5	0.1624	-0.534	去离子水
5	0.2769	-0.455	异丙醇
2.5	0.1185	-0.434	去离子水
2.5	0.2612	-0.466	异丙醇
1	0.2281	-0.664	去离子水
1	0.4816	-0.318	异丙醇

3 结论

(1) 微尺度下, 流体流动不再符合泊肃叶方程, 表现出非线性特征.

(2) 半径越小, 流固相互作用对流动的影响越大, 流动偏移理论值越多, 非线性越强.

(3) 流体极性越强, 固液相互作用越强, 对近壁区域流体分子的束缚作用越强, 边界层越厚.

(4) 随着压力梯度升高, 边界层厚度逐渐减小, 最终恒定; 流动的非线性特征逐渐减弱, 最终转化为线性流动.

图9 (网络版彩色)修正泊肃叶方程计算结果. (a) $r = 1 \mu\text{m}$, 去离子水; (b) $r = 1 \mu\text{m}$, 异丙醇

Figure 9 (Color online) The flow rate calculated by corrected Poiseuille equation. (a) $r = 1 \mu\text{m}$, deionized water; (b) $r = 1 \mu\text{m}$, isopropanol

图10 (网络版彩色)修正滑移距离率随压力梯度变化。(a) $r=7.5\ \mu\text{m}$; (b) $r=5\ \mu\text{m}$; (c) $r=2.5\ \mu\text{m}$; (d) $r=1\ \mu\text{m}$

Figure 10 (Color online) Corrected thickness of boundary layer. (a) $r=7.5\ \mu\text{m}$; (b) $r=5\ \mu\text{m}$; (c) $r=2.5\ \mu\text{m}$; (d) $r=1\ \mu\text{m}$

参考文献

- Wang F, Yue X A, Xu S L, et al. Influence of wettability on flow characteristics of water through microtubes and cores (in Chinese). Chin Sci Bull, 2009, 54: 972–977 [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. 科学通报, 2009, 54: 972–977]
- Xu S L, Yue X A, Hou J R. Experimental study on characteristics of water flow in micro tubes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2007, 52: 120–124 [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. 科学通报, 2007, 52: 120–124]
- Li S M, Zhang A Y, Wang T G. The adsorb of polar component in oil and wettability of the reservoir (in Chinese). Geol Sci Tech Inf, 1998, 17: 66–71 [李素梅, 张爱云, 王铁冠. 原油极性组分的吸附与储层润湿性及研究意义. 地质科技情报, 1998, 17: 66–71]
- Pfahler J, Harley J, Bau H, et al. Liquid transport in micron and submicron channels. Sensor Actuat A-Phys, 1990, 22: 431–434
- Mala G M, Li D Q. Flow characteristics of water in microtubes. Int J Heat Fluid Flow, 1999, 20: 142–148
- Li D Q. Electro-viscous effects on pressure-driven liquid flow in microchannels. Colloids Surf A, 2001, 195: 35–57
- Cui H H, Li Z H, Zhu S N. Flow characteristics of liquids in microtubes driven by a high pressure. Phys Fluids, 2004, 16: 1803–1810
- Yue X A, Wang F, Tang M, et al. Experimental study on flow characteristics of polymer solutions in microtubes (in Chinese). Chin J Theor Appl Mech, 2011, 43: 90–96 [岳湘安, 王斐, 唐鸣, 等. HPAM 稀溶液在微圆管中流动特性的实验研究. 力学学报, 2011, 43: 90–96]
- Мархасин И Л. Li D W, trans. The Physical Chemistry Mechanism of Reservoirs (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1987 [马尔哈辛, 李殿文, 译. 油层物理化学机理. 北京: 石油工业出版社, 1987]
- Huang Y Z. Percolation Mechanism of Low Permeability Reservoir (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1998 [黄延章. 低渗透油层渗流机理. 北京: 石油工业出版社, 1998]
- Xu Y T, Xu Q, Guo Y G, et al. The Percolation Mechanism of Low Permeability Reservoir Research and Application (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2006 [徐运亭, 徐启, 郭永贵, 等. 低渗透油藏渗流机理研究及应用. 北京: 石油工业出版社, 2006]
- Xu S L, Yue X A. Experimental research on nonlinear flow characteristics at low velocity (in Chinese). J China Univ Petrol (Nat Sci Ed), 2007, 31: 60–63 [徐绍良, 岳湘安. 低速非线性流动特性的实验研究. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31: 60–63]

- 13 Li Z F, He S L. The effect of boundary layer on seepage in low permeability reservoir (in Chinese). *Petrol Geol Oilfield Dev Daqing*, 2005, 24: 57–59 [李中锋, 何顺利. 低渗透储层原油边界层对渗流规律的影响. *大庆石油地质与开发*, 2005, 24: 57–59]
- 14 Li Y, Lei Q, Liu X G, et al. Non-linear seepage flow characteristics under micro scale (in Chinese). *Petrol Explor Dev*, 2011, 38: 336–340 [李洋, 雷群, 刘先贵, 等. 微尺度下的非线性渗流特征. *石油勘探与开发*, 2011, 38: 336–340]
- 15 Tian X F. The Nonlinear Percolation Characteristics and Model of Ultra-Low Permeability Reservoirs (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: China University of Petroleum, 2015. 17–21 [田琥丰. 超低渗透油藏非线性渗流特征及模型. 博士学位论文. 北京: 中国石油大学, 2015. 17–21]
- 16 Wen J R, Liu K P, Sun Z H, et al. Influence of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ laminated films on the hydrophilicity of glass surfaces (in Chinese). *Surf Tech*, 2014, 43: 90–94 [温久然, 刘开平, 孙志华, 等. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合薄膜对玻璃亲水性的影响. *表面技术*, 2014, 43: 90–94]

Summary for “不同极性牛顿流体的微尺度流动”

Flow of Newtonian fluids with different polarity in micro scale

WU JiuZhu*, CHENG LinSong, LI ChunLan, CAO RenYi, CHEN ChangChao & XU ZhongYi

Petroleum Engineering College, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

* Corresponding author, E-mail: 2015312032@student.cup.edu.cn

Due to the great development of medicine, micro-electro mechanical systems (MEMS) and seepage theory of unconventional oil and gas, fluid flow especially liquid flow in micro scale is getting more and more attention. In micro scale, flow is affected by many factors which are negligible in macro scale, thus shows different characteristics compared to conventional theory, such as Navier-Stokes equations.

Aiming to study the flow characteristics of deionized water and isopropanol in micro scale, a visual experimental device is established. The direct objective is to measure flow rate of experimental fluids under different pressure gradient, in microtubes with different radius. The pressure is measured directly by pressure transducer. Flow rate is measured indirectly by measuring the displacement of the meniscus in metering tube in a measureable time interval. The tubes are made of fused silica. We choose deionized water and isopropanol as experimental fluids because they both have hydroxide radical. The polarity of water and isopropanol is 10.2 and 4, respectively. The pressure gradient ranges 0.04–24.8 MPa/m. The radius of tubes range 1–7.5 μm . The length of experimental tubes ranges 8–49 cm. Uncertainty of all experiments is less than 3%.

The results showed that fluid flow in microtubes with radius smaller than 7.5 μm did not conform to Navier-Stokes equations. Experimental flow rate is lower than theoretical value calculated by Poiseuille equation. The flow rate deviation ranges 7.53%–70.75%. Flow rate-pressure gradient curves showed nonlinear characteristics in all experiments. Based on the boundary layer theory of laminar flow, the thickness of boundary layer is calculated. Relationship between boundary layer thickness and its influencing factors is investigated. In this study, thickness of boundary layer is positively correlated with polarity and viscosity, while it is negatively correlated with pressure gradient and radius of the tube. There was a power function relationship between the thickness of boundary layer and pressure gradient. Coefficients and the powers are regressed for all eight experiments, and Poiseuille equation is corrected based on the thickness function of boundary layer. The fitting result is quite good. Polarity is an important factor affecting fluid flow in micro scale. In order to compare the flow characteristics of fluids with different polarity, the impact of viscosity is eliminated. The comparison shows that the stronger the polarity, the thicker the corrected thickness of boundary layer.

In conclusion, fluid flow in microtubes is affected by pressure gradient, radius, viscosity and polarity of fluid and solid wall molecules. Under low pressure gradient, micro flow shows nonlinear characteristics, which declines as pressure gradient increases since the efficient flow space is enlarged continuously. When the pressure gradient is high, the thickness of boundary layer is constant, and the nonlinear flow converses to linear flow. The reason is that thickness of boundary layer decreases with pressure gradient. As for fluid solid interaction, it is the inter-attractive between –OH in fluid molecules and polarized silica wall. As a result, a stagnant fluid layer is formed near the wall. For fluid with greater polarity, the effect of fluid-solid interaction on micro flow is greater, and the normalized thickness of boundary layer is larger, the upper limit of nonlinear flow is higher as well.

micro scale, microtubes, nonlinear flow, molecule polarity, boundary layer

doi: 10.1360/N972016-01171