

微圆管中流体的微观流动机制

朱维耀, 田英爱, 于明旭, 韩宏彦, 张雪龄

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘要 针对低渗透油藏储层孔隙喉道小的特点, 采用管径为 20、15、10、5 μm 的微圆管, 以去离子水和煤油为流动介质, 研究微圆管中流体的微观流动规律, 分析去离子水和煤油的实验流速、有效边界层厚度与压力梯度的关系, 考察壁面润湿性和流体黏度对微流动规律的影响。研究表明, 微管中流体流速与压力梯度基本成线性关系, 随着微管管径的减小, 流体流动的非线性程度增强, 且驱动压力越大, 微管有效边界层厚度越小, 参与流动的流体更多, 有效流体边界层厚度占微管管径的比例也随之降低; 微管壁面由亲水性变为疏水性后, 流体流速均高于改性前, 微管管径越大, 作用效果越显著; 改变流体黏度时, 出现明显的启动压力梯度特征, 实验流体黏度从 2.40 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 增至 10.20 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时, 对应的启动压力梯度由 1.26 MPa/m 增加到 6.83 MPa/m 。

关键词 低渗透; 微圆管; 微流动; 启动压力梯度

中图分类号 O357.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.27.003

Mechanism of Microscopic Fluid Flow in Microtubes

ZHU Weiyao, TIAN Ying'ai, YU Mingxu, HAN Hongyan, ZHANG Xuelling

Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Abstract Low permeability reservoir usually has small pore throat. Based on this characteristic, the mechanism of microscopic fluid flow in microtubes was studied using one-dimensional microtubes with inner diameters of 5, 10, 15, 20 μm with deionized water and kerosene as the flow media. The relationships among flow rate, boundary layer thickness and pressure gradient are revealed. Microtubule surface wettability was changed from hydrophilic to hydrophobic with mixtures of dimethyldichlorosilane, kerosene, and silicone resin in different proportions to form four different simulated oil viscosities to study the law governing the fluid flow. The results show that the fluid flow rate had a linear relationship with pressure gradient, but nonlinearity of fluid flow gradually increased with decrease of the microtubule diameter. Also, the higher the driving pressure, the smaller the effective boundary layer thickness, and the ratio of effective fluid boundary layer thickness to microtubule diameter decreased with pressure gradient. The fluid velocity was higher than that before modification of the microtubule wall from hydrophilic to hydrophobic, and the larger the size of microtubes, the more significant the effect. The pressure gradient increased significantly from 1.26 MPa/m to 6.83 MPa/m when the viscosity of the flow media was changed from 2.40 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ to 10.20 $\text{mPa}\cdot\text{s}$.

Keywords low permeability; microtubes; microflow; pressure gradient

掌握流体在微尺度效应下的微观流动规律, 是实现高效开采的基础。研究流体在低渗透储层内的渗流问题, 对于石油天然气等地下流体资源开发、地面工程及河流堤坝防渗等具有重要意义^[1-4]。低渗透油藏储集层孔道微细, 孔隙结构复杂, 比表面积较大, 流体分子的平均自由程与流动特征尺寸比值相对增大, 流体流动规律明显不同于宏观尺度下的流动, 流动特性不再符合传统连续介质流体力学理论, 流体在低渗透储层中流动产生微尺度效应^[5-8]。目前, 许多学者试图

从微观动力学角度解释微通道中流体的流动现象。孙尚武等^[9]在不同微圆管中进行了水和硅油的流动实验, 发现 Navier-Stokes 方程依然适应, 但选用的微管管径均在 10 μm 以上; 王斐等^[10]研究了亲水和疏水的微圆管内水的流动特性, 发现流动规律偏离经典理论, 避免润湿性对偏离程度有一定的影响; 李洋等^[11]在管径为 5~20 μm 的熔融石英微管中进行了去离子水的流动特征实验研究, 认为微管中流体的低速流动具有非线性特征, 且随着微管半径减小, 流动非线性程度

收稿日期: 2014-06-10; 修回日期: 2014-07-02

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05051); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB228002); 教育部专项(FRF-MP-B 12006B)

作者简介: 朱维耀, 教授, 研究方向为渗流力学、流体力学、油气田开发, 电子邮箱: weiyao@sina.com

引用格式: 朱维耀, 田英爱, 于明旭, 等. 微圆管中流体的微观流动机制[J]. 科技导报, 2014, 32(27): 23-27.

增强,但并未考察微管壁面的润湿性和流动介质黏度对流动规律的影响。

本文采用4种不同管径的微圆管进行一维孔道流体流动模拟实验,研究去离子水和煤油的微观流动规律,从固-液界面及分子间作用力入手,考察微管壁面润湿性和流体黏度对微流动规律的影响,从微观上阐述微流动中的尺度效应,分析低渗油藏低速非线性渗流特征产生的原因。

1 微圆管中流体流动实验

1.1 材料

实验所用流动载体为石英毛细管,通过扫描电镜测得管径值为20、15、10、5 μm的微管(内表面粗糙度远小于5%,可按照水力光滑处理),该微圆管外壁包覆有标准的聚酰亚胺涂层,所以微管具有较好的柔韧性和强度,可以保证实验顺利进行;流动介质选择去离子水、煤油。

1.2 装置及分析方法

实验装置主要由供压系统和测量系统两部分组成。基本实验流程如图1所示。供压系统以高压氮气瓶作为压力源。氮气经减压阀、三级过滤器和低压缓冲罐后进入储液罐中,储液罐中的流体在高压氮气的压力作用下被平稳地输送到石英微管中,通过在微管末端连接的计量玻璃毛细管测量流量。测量方法如图2所示,计量管穿过光电式微流量测量仪的光电二极管,通过在计量管中的某一位置处注入一个气泡,形成气液界面,当感应到界面时,光电二极管被触发,仪器上秒表自动开始计时。当气液界面达到预先设定好的位移量时,光电二极管触发信号终止计时。根据实验测得流体流动位移 s 与时间 t 计算出微管中流体流速 v 。

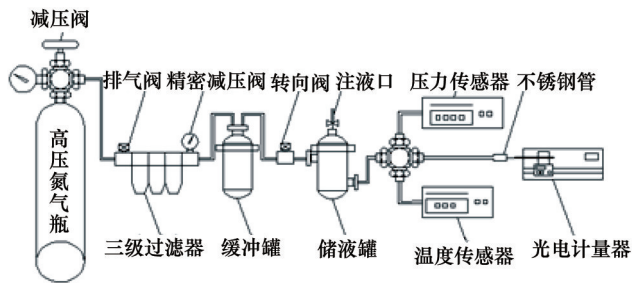


图1 微流动实验流程示意

Fig. 1 Schematic of micro-flow experimental procedure

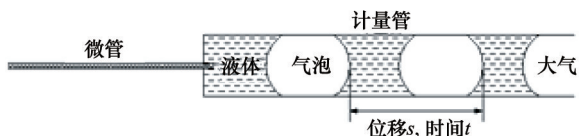


图2 计量管内位移法测流量示意

Fig. 2 Displacement method for measure the flow in metering tube

根据实验测得流体流速 v , 得出流体实际流量为

$$Q = vA \quad (1)$$

其中, A 为微管横截面积, m^2 。

根据 Hagen-Poiseuille 方程, 对于长度 L , 压降为 ΔP 的微圆管, 得到压降 ΔP 与流量 Q 的关系^[11]

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128 \mu L} \quad (2)$$

其中, D 为微管管径, m ; ΔP 为流动压差, Pa ; μ 为实验流体黏度, $mPa \cdot s$; L 为实验微管长度, m 。

边界流体层的存在是固-液界面的固有性质,但在压力驱动的微尺度流动过程中,边界流体层随着驱动压力的变化而变化^[11,12]。从微观上讲,认为每一个流动微元依然遵从 Hagen-Poiseuille 方程。因此,考虑固-液界面流体有效边界层的厚度,可以将 Hagen-Poiseuille 方程改写为

$$Q = \frac{\pi(r-\delta)^4 \Delta P}{8\mu L} \quad (3)$$

将式(3)变形,可以求解出有效边界层厚度 δ 与压力梯度的关系

$$\delta = r - \left[\frac{8\mu L Q}{\pi \Delta P} \right]^{1/4} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 实验流速与压力梯度的关系

如图3(a)所示,在同样的压力梯度下,去离子水在微管中的流速随着微管管径减小而降低,因为,当微管管径降到一定程度时,体积力的作用下降,分子间力(固体表面与流体分子间的作用力)的作用却上升,超过了体积力,且随着尺度的减小,黏性力作用相对增强^[13],惯性力作用变小,越靠近固体表面这种规律越明显;在同一微管管径下,随着驱动压力梯度的增大,去离子水的流动速度迅速增加。在整个实验压力范围内,实验流速与压力梯度基本成线性关系,低压力梯度条件下4种管径中流体流速出现不同程度的非线性特征,且管径越小,非线性程度越明显。特别是管径为5 μm的微圆管中,压力梯度小于22 MPa/m时,平均流速与压力梯度的非线性程度尤为明显(图4(a)),说明低压力梯度下,尺度效应非常突出,表面作用的增加使质量、动量和能量的交换发生本质的变化,进而影响了流体在微管中的流动特征。

煤油的微尺度流动规律与去离子水的实验现象类似(图3(b)),实验流速随着驱动压力梯度增大而增大,整体实验数据较一致,非线性特征并不显著,仅当微管管径减小到5 μm时,煤油实验流速与压力梯度关系曲线略表现出非线性特征(图4(b))。与去离子水的流动实验结果相比,同样在20 μm的微管中,压力梯度20 MPa/m时,去离子水流速为 9.94×10^{-5} m/s,而以煤油为流动介质时,流动速度显著高于去离子水的流动速度,达到 14.44×10^{-5} m/s,且4种管径的实验结果均体现了这一现象,因为实验所用微管为石英材质,石英是极性亲水壁面,对水分子的作用范围较大,微管壁面对水的吸引作用比对油的吸引作用大得多,所以导致上述结果。

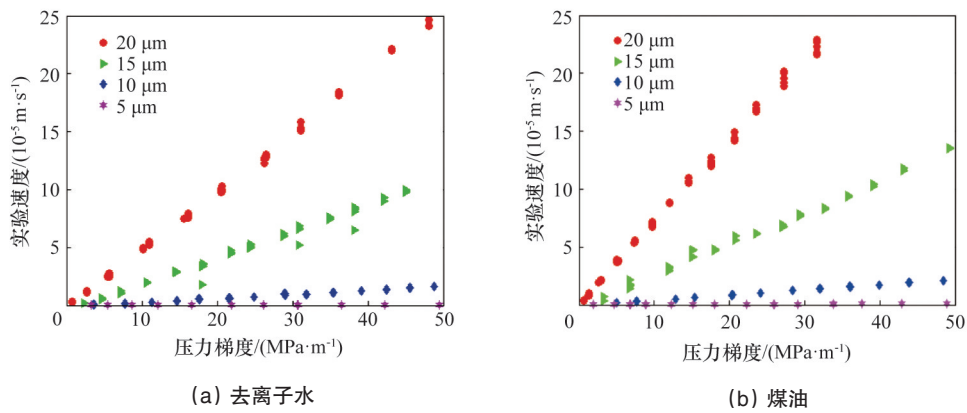


图3 不同微管中液体流速与压力梯度的关系

Fig. 3 Relationships between flow rate and pressure gradient in different microtubules

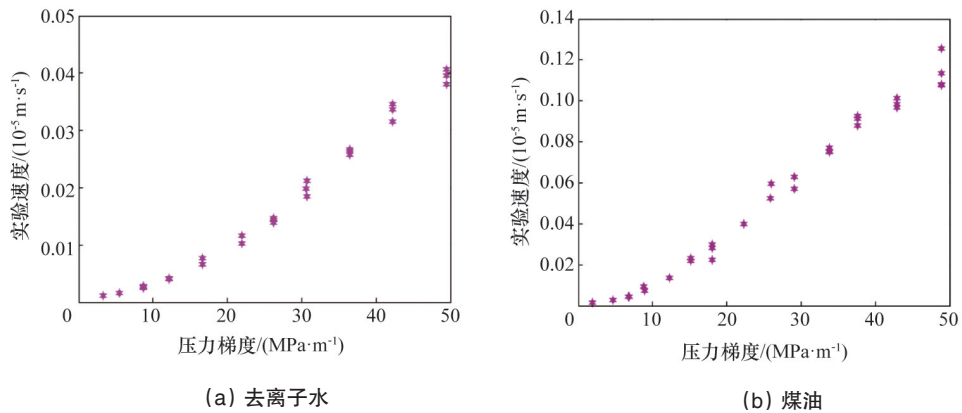


图4 5 μm微管中液体流速与压力梯度的关系

Fig. 4 Relationships between flow rate and pressure gradient in microtubules (5 μm)

2.2 有效边界层厚度与压力梯度关系

边界层是直接紧贴着固相表面的液体层,是原油中的活性成分在多孔介质表面吸附造成的。油藏条件下,吸附是十分复杂的物理、化学及物理化学综合过程。吸附边界层决定了渗流通道中流体的分布并不均匀,使得将孔隙介质孔道中部的流体(体相流体)和直接与孔隙介质内表面相接触的流体(边界流体)视为等同的观点并不合理^[14,15]。随着管径减小,边界层流动的作用变得显著起来,随驱替压力梯度的增大,边界层越薄,同时须克服的流体屈服应力值也越大,导致渗流出现非线性的特征。

根据式(4)求得该微圆管有效边界层厚度与压力梯度的关系。从图5可以看出,4种管径微管中流体流动时都存在有效边界层,对流体的流动特征产生影响。结果表明,驱动压力梯度越小,微管中有效边界层厚度越大,参与流动的流体越少,但随着驱动压力梯度的增加,边界层厚度逐渐减小至平缓。由于壁面的亲水性及流体分子间相互牵引与拖曳的影响,即使在高压梯度下,边界流体依然吸附在微管壁上。如图6所示,管径20 μm微管中有效边界层厚度占管径最大比例达到43.48%,最小比例为41.71%,而在管径5 μm微

管中有效边界层厚度占管径最大比例达到72.57%,最小比例为71.05%,可见,在相同压力梯度下驱动不同微管管径中的流体,能被动用的流体流量份额各不相同,管径越大,份额越大,管径越小,份额越小,且边界流体受到固-液界面分子间作用力的影响越强。

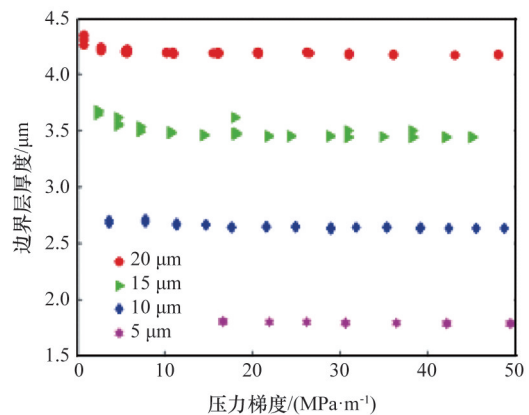


图5 不同微管管径中有效边界层厚度与压力梯度的关系

Fig. 5 Relationship between boundary layer thickness and pressure gradient

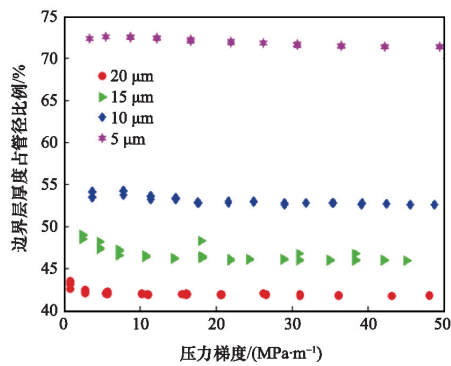
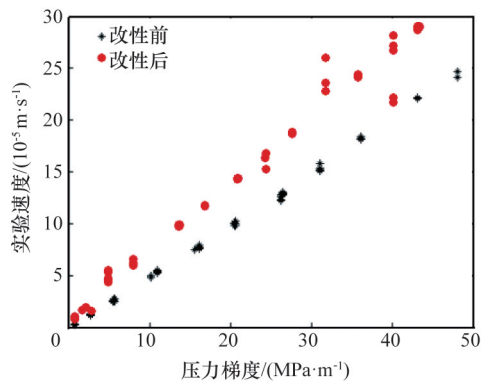
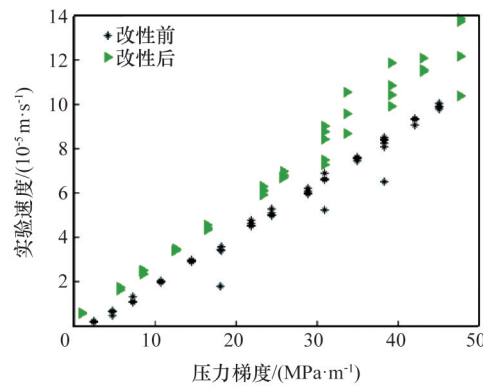


图6 有效边界层厚度占管径比例与压力梯度的关系

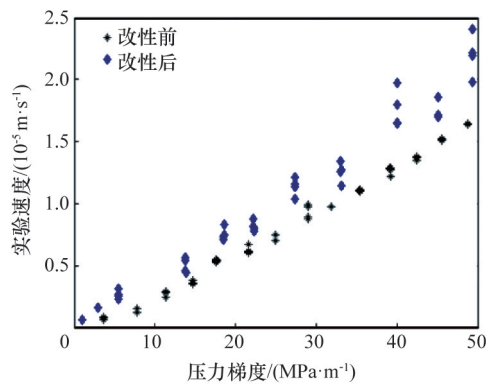
Fig. 6 Relationship between the ratio of effective boundary layer thickness Proportion to microtubule diameter and pressure gradient



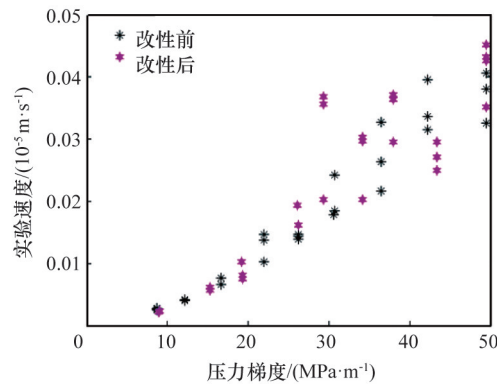
(a) 20 μm



(b) 15 μm



(c) 10 μm



(d) 5 μm

图7 各微管中去离子水改性前后流速与压力梯度的关系

Fig. 7 Relationships between flow velocity and pressure gradient before and after modification in microtubules

2.3.2 流体黏度对微流动规律影响

为了进一步明确流体黏度对微尺度流动影响,在相同实验条件下,开展不同黏度混合油流动特征研究。20℃下测得煤油黏度为2.40 mPa·s,将煤油与二甲基硅油配成黏度为

2.3 流体流动的影响因素

2.3.1 壁面润湿性对微流动的影响

以0.1%的二甲基二氯硅烷作为流动介质,使石英微管中充满二甲基二氯硅烷以改变其润湿性,然后将微管水平静置在80℃恒温箱中,老化24 h后取出,用高压氮气清除微管内壁的杂质。

图7为不同微管管径中去离子水改性前后流速与压力梯度的关系曲线。可以看出,微管壁面润湿性反转后,流体流速均高于改性前,且微管尺寸越大,作用效果越显著。这是因为石英本身是一种亲水性物质,未经处理前,微管壁面对水的吸附力较强,改性处理后,微管壁面表现为疏水性,对水的吸附力减小,从而流体的流动阻力随之降低,流量就会相应增大^[16]。当微管管径达到5 μm时,改性效果不明显。

4.44、6.54和10.20 mPa·s的混合油。从图8可以看出,20 μm微管中,流体黏度越小,实验数据越接近线性流^[17,18],实验流体黏度为2.40 mPa·s时,启动压力梯度为1.26 MPa/m,黏度增至10.20 mPa·s时,启动压力梯度增6.83 MPa/m。

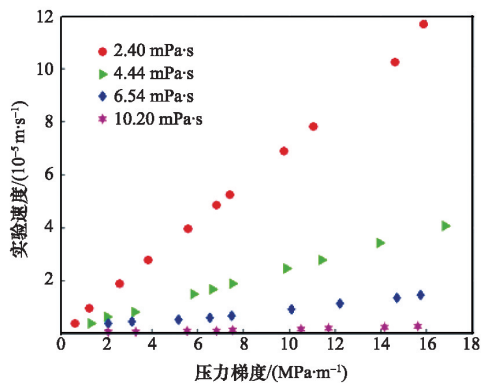


图8 20 μm 微管中不同黏度煤油流速与压力梯度的关系
Fig. 8 Relationship between flow velocity and pressure gradient Different viscosity kerosene of kerosene at different viscosities in microtubules (20 μm)

3 结论

1) 实验压力梯度范围内,去离子水和煤油的流速与压力梯度基本呈现线性关系,微管管径越小,非线性特征越突出,且固-液界面分子间作用力对边界流体受到的影响越明显,参与流动的流体越少。

2) 微管由亲水变为亲油性后,微管壁面对水的吸引力将减小,4种管径下流体流速均高于改性前的流速,但对5 μm 的微管改性效果不明显。

3) 改变流体黏度对微流动有显著的影响,且黏度大的流体流动时出现明显的启动压力梯度特征,实验流体黏度从2.40 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 增至10.20 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时,对应的启动压力梯度由1.26 MPa/m 增加到6.83 MPa/m 。

参考文献 (References)

- [1] 霍英彩,张永成,贾敏.低渗透油藏评价研究现状[J].内蒙古石油化工,2009(17):132-135.
Huo Yingcai, Zhang Yongcheng, Jia Min. Research of low permeability reservoir evaluation[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009 (17): 132-135.
- [2] 胡文瑞.中国低渗透油气的现状与未来[J].中国工程科学,2009,11(8):29-37.
Hu Wenrui. The present and future of low permeability oil and gas in China[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(8): 29-37.
- [3] 黄延章.低渗透油层非线性渗流特征[J].特种油气藏,1997,4(1):9-11.
Huang Yanzhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 1997, 4(1): 9-11.
- [4] 蔡宝君.基于微观渗流机理的宏观渗流规律研究[D].东营:中国石油大学,2010.
Cai Baojun. Study of macroseepage flow law based on microseepage mechanism[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2010.
- [5] 张楠,孙中宁.多孔介质通道内气-液两相流动阻力特性实验[J].核动力工程,2011,32(3):106-110,126.
Zhang Nan, Sun Zhongning. Experimental investigation on resistance characteristics of two-phase flow through porous mediachannel[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(3): 106-110, 126.
- [6] 杨仁锋,姜瑞忠,孙君书,等.低渗透油藏非线性微观渗流机理[J].油气地质与采收率,2011,18(2):90-97.
Yang Renfeng, Jiang Ruizhong, Sun Junshu, et al. Studies on non-linear flow mechanism in low permeability porousmedium[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(2): 90-97.
- [7] 凌智勇,丁建宁,杨继昌,等.微流动的研究现状及影响因素[J].江苏大学学报:自然科学版,2002,23(6):1-5.
Ling Zhiyong, Ding Jianning, Yang Jichang, et al. Research advance in microfluid and its influencing factors[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2002, 23(6): 1-5.
- [8] 李卓,唐桂华,陶文铨.微通道中极性流体流动特性的研究[J].西安交通大学学报,2007,41(3):274-278.
Li Zhuo, Tang Guihua, Tao Wenquan. Investigation on flow characteristics of polar fluids in microchannels[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 274-278.
- [9] 孙尚武,凌智勇,杨继昌,等.两种液体在微圆管道内流动特性的试验研究[J].机械设计与制造,2005,1(7):112-113.
Sun Shangwu, Ling Zhiyong, Yang Jichang, et al. Experimental research on two kinds of liquid flow in microchannels[J]. Machinery Design and Manufacture, 2005, 1(7): 112-113.
- [10] 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 microscale flow and seepage characteristics of simulated crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 302-305.
- [11] 李洋,雷群,刘先贵,等.微尺度下的非线性渗流特征[J].石油勘探与开发,2011,38(3):336-340.
Li Yang, Lei Qun, Liu Xiangui, et al. Characteristics of micro scale nonlinear filtration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 336-340.
- [12] 王斐,岳湘安,庞宏伟,等.低渗透储层中氮气的微尺度流动及其对渗流的影响[J].西安石油大学学报:自然科学版,2012,27(1):57-59.
Wang Fei, Yue Xiang'an, Pang Hongwei, et al. Micro-scale flow effect of nitrogen in low-permeability reservoir and its influence on gas seepage[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(1): 57-59.
- [13] Kandlikar S. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2-4): 389-407.
- [14] Pfahler J, Harley J, Bau H, et al. Liquid and gas transport in small channels[J]. Proceeding of ASMEDSC, 1990, 31: 685-692.
- [15] 刘卫东,刘吉,孙灵辉,等.流体边界层对低渗透油藏渗流特征的影响[J].科技导报,2011,29(22):42-44.
Liu Weidong, Liu Ji, Sun Linghui, et al. Influence of fluid boundary layer on fluid flow in lowpermeability oilfields[J]. Science and Technology Review, 2011, 29(22): 42-44.
- [16] 凌智勇,刘勇,丁建宁,等.亲水性和疏水性微管道中流动滑移特性的实验研究[J].中国机械工程,2006,17(22):2326-2329.
Ling Zhiyong, Liu Yong, Ding Jianning, et al. Experimental study on the characteristics of slip in hydrophilic and hydrophobic microchannels[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(22): 2326-2329.
- [17] Kumar V, Paraschivoiu M, Nigam K. Single-phase fluid flow and mixing in microchannels[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(7): 1329-1373.
- [18] 林彦兵,刘艳,侯光东.低渗透油田粘度效应的实验研究[J].特种油气藏,2004,11(4):95-97.
Lin Yanbing, Liu Yan, Hou Guangdong. Experimental study of the effect in low-permeability oil viscosity[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2004, 11(4): 95-97.

(责任编辑 刘志远)