

微圆管中纳微米聚合物流动规律

朱维耀¹, 朱晓阳¹, 曹孟菁¹, 张雪龄², 于明旭¹

1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083
2. 郑州轻工业学院能源与动力工程学院, 郑州 450002

摘要 针对低渗透油藏储集层孔道微细、孔隙结构复杂等特点, 采用管径为 20、15、10 μm 的微圆管, 以纳微米聚合物颗粒溶液为流动介质, 研究微圆管中流体微观流动规律, 分析纳微米聚合物颗粒溶液的实验流速与压力梯度的关系, 研究纳微米聚合物颗粒溶液在窄小孔道中微尺度效应下的微观流动规律, 明确在微管内所受微观力和流体动力学特性。研究表明: 随着微管内径的逐渐减小, 纳微米聚合物溶液的流速均明显减小; 随着纳微米聚合物颗粒尺寸和溶液质量浓度的增加, 流体流速逐渐降低; 实验压力范围内, 纳微米聚合物流速与压力梯度基本呈线性关系; 微管管径越小, 颗粒粒径越大, 非达西流动特征越显著。

关键词 低渗透; 微圆管; 微观流动; 纳微米聚合物

低渗透油田储层渗透率小、流动性差, 且非均质程度远大于中高渗透油藏。开采过程中, 注入水会沿高渗透通道窜进, 使得含水率大幅增大, 因而控制含水上升程度成为低渗透油田开采的热点和难点^[1-2]。室内研究和矿场试验表明, 纳微米聚合驱是提高低渗透油田开发效果的主要手段之一^[3-4]。该驱替将纳微米级别聚合物颗粒与低渗透油藏的孔喉结构相匹配, 通过纳微米聚合物颗粒在多孔介质中的自由移动, 发挥液流改向和调驱的作用, 从而有效地对流动通道进行封堵, 控制水窜, 提高波及体积和洗油能力, 从而更好地开采低渗透储层内剩余油, 提高原油采收率, 增加经济效益^[5-7]。低渗透油藏具有孔道微细, 孔隙结构复杂, 比表面积较大的特点, 流体分子的平均自由程与流动特征尺寸比值相对增大, 流动规律明显不同于宏观流动, 流动特性不再符合传统连续介质流体力学理论。从进入储层微孔道到与孔壁吸附的整个过程中, 纳米颗粒所受作用力在不断变化, 并与所处运动状态和位置有关。纳米颗粒在微孔道中大致有两种状态: 一是注入过程, 纳米颗粒随分散液进入孔道, 处于流动状态, 此时主要作用能包括流体携曳动能、布朗运动能、沉降动能、范氏作用能和静电作用能; 二是关井期间, 处于静置状态, 这时, 携曳动能消失, 沉降动能较小可忽略。纳米颗粒受到的主要作用力为布朗作用力、范氏作用力和静电作用力。此外, 在低渗透储层中流动会产生微尺度效应^[8-10]。现有的研究中大多尝试从微观动力学角度解释微通道中流体流动现象。徐绍良等^[11]研究了去离子水在多种微圆管中的流动实验, 发现在较小管径的微圆管中的低速流动呈现出明显的

非线性特征, 实验结果偏离经典流体力学理论; 王斐等^[12]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^[13]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, 流动非线性程度增强。贾晓飞等^[14]通过纳微米聚合物在岩心物理模型运移过程的“波动式运移”变化, 表征了纳微米聚合物的封堵机制。

本文通过用微管的渗流模型代替传统的驱替岩心模型, 更加的直观可视, 在管径为 10、15 和 20 μm 的微圆管内, 开展流体驱替实验, 考虑分子间作用力和黏度因素, 研究不同纳微米聚合物颗粒尺寸、颗粒浓度等对流动规律的影响。研究所用纳微米聚合物为实验室自制的介孔氧化硅/聚 N, N'-亚甲基双丙烯酰胺 (mSiO₂-MB/PMBAAm)。纳微米聚合物颗粒的特性符合低渗透油田的提高采收率需求。同时, 纳微米聚合物颗粒成本低廉, 颗粒粒径变化和变形强度等特性可以根据油藏物性特征进行调整。因此, 研究纳微米聚合物的流动规律具有十分重要的意义。

1 微观流动实验研究

1.1 实验样品及材料

实验所用微圆管为进口的熔融石英管, 内径分别为 10、15、20 μm 。实验所用的纳微米聚合物是 mSiO₂-MB/PMBAAm 核壳结构的多功能复合微球, 由扫描电镜测得干燥复合球粒径为 200~1200 nm, 用去离子水配制成质量浓度分别

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2015-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11372033)

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, 朱晓阳, 曹孟菁, 等. 微圆管中纳微米聚合物流动规律[J]. 科技导报, 2016, 34(24): 101-105; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.24.014

为 200、500、1000 mg/L 的稀溶液。

1.2 实验仪器

高压氮气瓶: 提供实验段驱动压力; 三级过滤器: 过滤氮气中的颗粒杂质; 减压阀: 能够粗略调节实验所需压力; 精密减压阀: 能准确调节实验所需压力; 缓冲罐: 能使气体流动更加平稳; 储液罐: 内装实验用液体; 温度传感器: 用于测量微圆管进出口实验段液体温度, 精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; 压力传感器: 用于测量微圆管进出口实验段液体压差, 量程为 0~1.0 MPa, 误差为 0.001 MPa; 光电计量器: 用来测量微管内流体流动流量, 流量不确定度随管径的降低而增加, 内径为 $5\ \mu\text{m}$ 时的纳微米聚合颗粒溶液测量不稳定, 实验数据重复率较低, 分散性较大, 实验数据不可取; 电子数显卡尺: 用来测量管长, 精度为 0.02 mm; 黏度计: 测量实验流体黏度, 偏差为 2%。

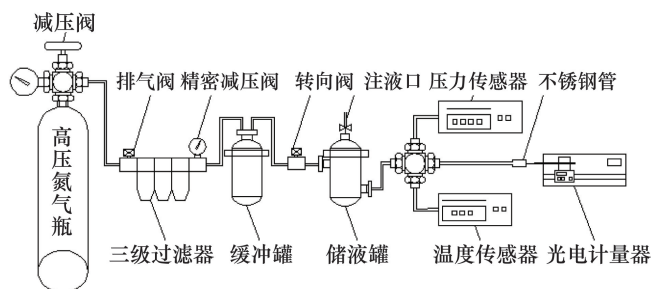


图1 微流动实验流程

Fig. 1 Diagram of micro-flow experimental procedure

由于微通道的尺寸很小, 实验段所承受的压力较大, 因此联合使用螺母和快速凝固胶, 确保微通道与不锈钢接头座的直接连接。首先, 根据实验所需预订石英微管的长度, 使用陶瓷切割片进行切割。切割后的微圆管应尽快进行实验装置连接, 开展实验, 防止长时间暴露引起空气中灰尘等杂质对微管的污染。然后, 用环氧树脂胶把微管两头分别粘在钢管(钢管的另一头连在塑料软管上)和玻璃毛细管上, 待黏结剂硬化即可使用。为降低计量部分的误差, 选用美国 Sutter 仪器公司出品的毛细玻璃管作为微流动计量管, 该管经过淬火抛光处理, 管内外径尺寸均一, 性质稳定。

1.3 实验方法

首先打开氮气瓶的减压阀, 让氮气充满精密减压阀之间的管路, 再打开储液罐和实验段之间的转向阀, 然后调节精密减压阀, 氮气从高压氮气瓶中流出, 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的输送到石英微管中, 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。

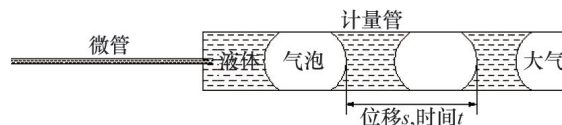


图2 计量管内位移法测流量示意

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

1.4 实验数据处理

根据实验测得流体流动位移 s 与时间 t 计算微管中流体流速 v 。然后, 根据实验测得流体流速, 得出流体实际流量:

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

式中, A 为微管横截面面积。

根据 H-P 方程, 对于长度 L , 压降为 ΔP 的微圆管, 得到压降与流量的关系:

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

式中, D 为微管管径; μ 为实验流体黏度。

2 实验结果分析

2.1 微管管径对微流动规律影响

图 3(a) 为质量浓度为 200 mg/L 纳微米聚合物颗粒溶液在不同微管管径中的实验流速与压力梯度的关系曲线。从曲线变化规律可以看出, 随着微管内径的逐渐减小, 纳微米聚合物颗粒溶液的流速迅速降低, 且降低幅度较大。造成这一现象的原因是, 当微管尺寸降低到一定程度时, 体积力作用减弱, 分子间作用力(固体表面与流体分子间的作用力)的作用增强并超过了体积力; 另一方面, 随着微观尺寸减小, 聚合物的黏性力作用相对增强^[15-17]。类似的变化规律在质量浓度 500 和 1000 mg/L 的溶液中也发现。在同一微管管径下, 随着驱动压力梯度的增大, 纳微米聚合物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呈线性关系。低压力梯度区域, 3 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。

另外, 选取去离子水和煤油两种介质研究微管管径对微流动规律的影响。图 3(b)、(c) 表明, 去离子水和煤油的微尺度流动规律与纳微米聚合物的实验现象类似, 流速会随着压力梯度增大而增大, 非线性特征并不明显。不同介质带来的区别主要体现在黏度不同, 随压力梯度变化, 流速的变化幅度不同。以图 3 中管径 $20\ \mu\text{m}$ 微圆管中 3 种介质的图像为例, 压力梯度每增加 $10\ \text{MPa/m}$, 3 种介质的流速分别增加 6.5×10^{-5} 、 5×10^{-5} 、 $1 \times 10^{-5}\ \text{m/s}$, 聚合物溶液流速的变化幅度是去离子水的 1.3 倍, 是煤油的 6.5 倍。

2.2 聚合物颗粒尺寸对微流动规律影响

图 4 给出了内径 $20\ \mu\text{m}$ 微管中不同粒径尺寸纳微米聚合物颗粒溶液实验流速与压力梯度的关系曲线, 证实了随着聚合物颗粒粒径的增加, 溶液流速显著降低, 微管中流体流动

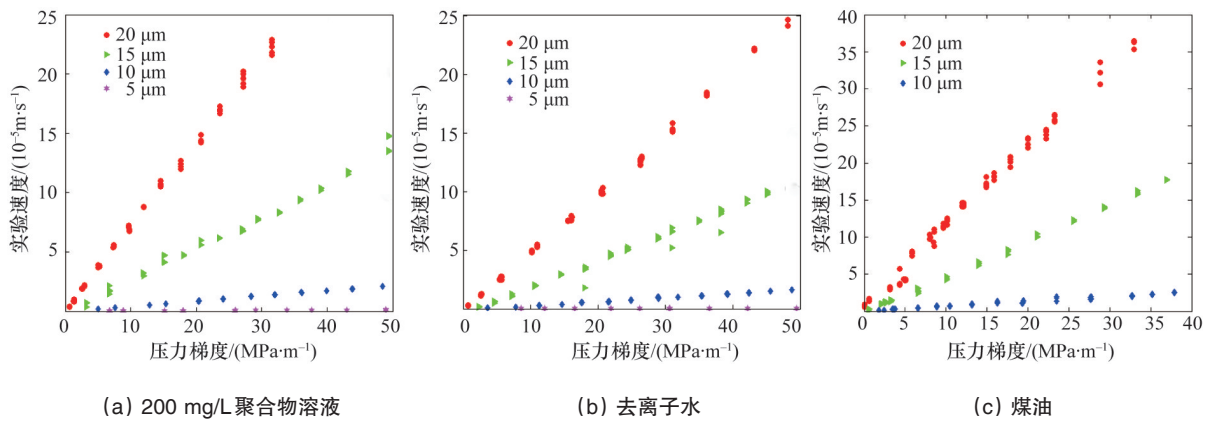


图3 不同管径微管中液体流速与压力梯度的关系

Fig. 3 Relationships between flow velocity and pressure gradient in different microtubes

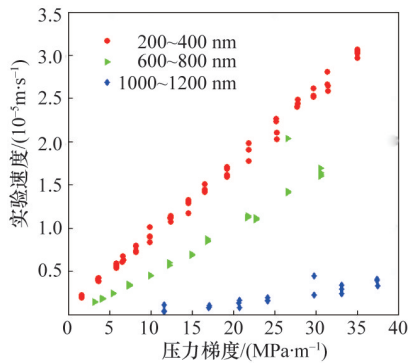


图4 不同粒径尺寸聚合物流速与压力梯度的关系

Fig. 4 Relationships between flow velocity and pressure gradient in different particle size of nano-micron polymer

所需驱动压力梯度不断增大^[18]。特别是粒径尺寸在 1000~1200 nm 的纳微米聚合物在微圆管中时,当压力梯度低于 12 MPa/m 时,液体不流动。压力高于 12 MPa/m 时,液体开始流动,且平均流速与压力梯度的非线性程度尤为明显。说明当纳微米聚合物粒径尺寸较大时,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。

2.3 聚合物溶液质量浓度对微流动规律影响

图 5(a)~(c) 给出了不同微管管径中不同质量浓度纳微米聚合物颗粒溶液实验流速与压力梯度的关系曲线,证实了随着纳微米聚合物颗粒溶液质量浓度的增加,流体流速逐渐降低,但速度变化幅度并未非常显著,而流体流动的最小驱动压力梯度不断增大^[18]。图 5 中亦发现,去离子水的实验流速并不是最高,而是接近于质量浓度为 1000 mg/L 的纳微米聚合物颗粒溶液的流速。这是因为纳微米聚合物颗粒对多种表面活性剂有抑制作用,而表面活性剂对流体流动有着降阻作用,因此在低质量浓度范围内,纳微米聚合物颗粒溶液的流速要高于去离子水。当质量浓度达到一定值,由于颗粒在溶液中受力等多因素作用后,随着纳微米聚合物颗粒溶液质量浓度的增加,流体流速继续下降至低于去离子水。图 5(c) 可以看出,10 μm 微管中能够测得的纳微米聚合物颗粒的最大质量浓度仅为 1000 mg/L,可见尺寸效应对流体流动有着显著影响。

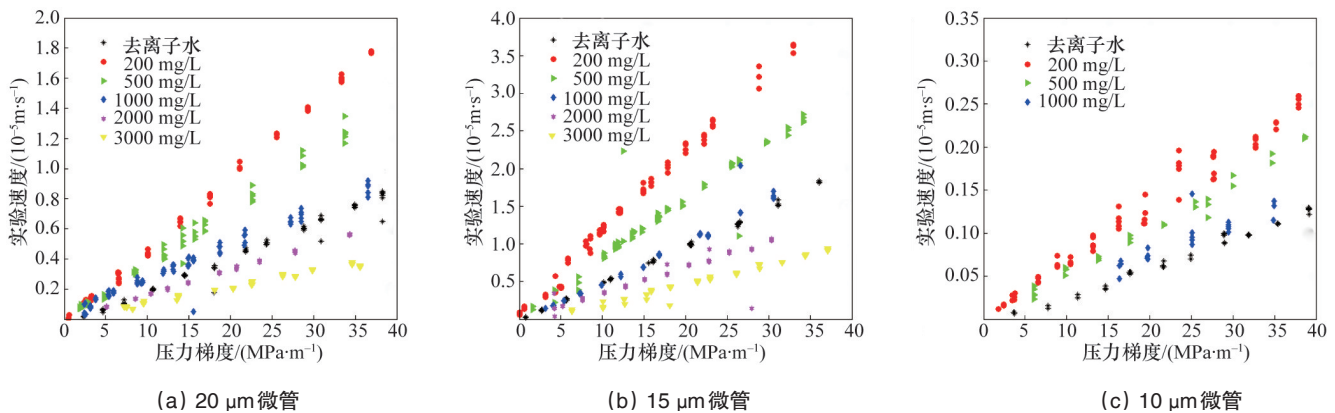


图5 各管径微管中不同浓度聚物流速与压力梯度的关系

Fig. 5 Relationships between flow velocity and pressure gradient of different nano-micron polymer concentration in different microtubes

3 结论

1) 随着微管内径的逐渐减小,所选取3种介质的流速均明显减小,整体的变化趋势一致,而区别在于流速的变化幅度不同。管径 20 μm 微圆管中,随压力变化,聚合物溶液流速的变化幅度是去离子水的 1.3 倍,是煤油的 6.5 倍。

2) 随着纳微米聚合物颗粒尺寸和溶液质量浓度的增加,流体流速逐渐降低。实验中,15 μm 和 20 μm 微管中能够测得的纳微米聚合物颗粒的最大质量浓度可达 3000 mg/L,10 μm 微管中能够测得的纳微米聚合物颗粒的最大质量浓度仅为 1000 mg/L,可见尺寸效应对流体有显著影响。

3) 整个实验压力范围内,纳微米聚合物流速与压力梯度基本呈线性关系。微管管径越小,颗粒粒径越大,非达西流动特征越显著。式中,颗粒粒径为 1000~1200 nm 的纳微米颗粒在 20 μm 微圆管中的流动,非达西流动特征非常显著。

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] Benyamin Y J, Riyaz K, Farshid T. A mechanistic analysis of viscous fingering in low-tension polymer flooding in heavy-oil reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(2): 228-232.
- [3] 张雪龄,朱维耀,蔡强,等. 考虑固壁作用力的微可压缩流体纳微米圆管流动分析[J]. 北京科技大学学报, 2014(5): 569-575.
Zhang Xueling, Zhu Weiyao, Cai Qiang, et al. Analysis of weakly compressible fluid flow in nano/micro-size circular tubes considering solid wall force[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014(5): 569-575.
- [4] Chauveteau G, Denys K, Zaitoun A, et al. New insight on polymer adsorption under high flow rates[C]/SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa: Society of Petroleum Engineers, 2002: 622-635.
- [5] 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.
Zhu Weiyao, Tian Yingai, Yu Mingxu, et al. Mechanism of microscopic fluid flow in microtubes[J]. Science and Technology Review, 2014, 32 (27): 23-27.
- [6] 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.
- [7] 郑明科,沈焕文,王碧涛,等. 聚合物纳微米微球调驱技术在低渗透油田的应用及效果[J]. 石油化工应用, 2012, 31(12): 32-35.
Zheng Mingke, Shen huanwen, Wang Bitao, et al. Polymer nanospheres control and flooding in low permeability oil fields and effects[J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(12): 32-35.
- [8] 林彦兵,刘艳,侯光东. 低渗透油田黏度效应的实验研究[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.
- [9] 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.
- [10] 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 nonlinear flow mechanism in low permeability porous medium[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(2): 90-97.
- [11] 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[J]. 科学通报, 2007, 52(1): 120-124.
Xu Shaoliang, Yue Xiang'an, Hou Jirui. Study on the flow mechanism of deionized water in microtubes[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (1): 120-124.
- [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 microscale flow and seepage characteristics of simulated crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 302-305.
- [13] 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.
- [14] 贾晓飞,雷光伦,李会荣,等. 孔喉尺度弹性微球运移封堵特性研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(2): 219-221.
Jia Xiaofei, Lei Guanglun, Li Huirong, et al. Migration and plugging properties of pore-scale elastic microspheres[J]. Block Oil and Gas Field, 2010, 17(2): 219-221.
- [15] Kandlikar S G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2): 389-407.
- [16] 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 low permeability oilfields[J]. Science and Technology Review, 2011, 29(22): 42-44.
- [17] 宋付权. 低渗透多孔介质和微管液体流动尺度效应[J]. 自然杂志, 2004, 26(3): 128-131.
Song Fuquan. Research of the size effect of liquid flow in low permeability porous media and microchannels[J]. Nature Magazine, 2004, 26 (3): 128-131.
- [18] 朱维耀,曹孟菁,蔡强,等. 多功能复合微球的制备及渗流应用[J]. 材料导报, 2015, 29(10): 9-13.
Zhu Weiyao, Cao Mengjing, Cai Qiang, et al. Synthesis of functional mesoporous Silica/poly composite materials and their application to seepage[J]. Science and Technology Review, 2015, 29(10): 9-13.

Flow mechanism of nano-micron polymer in microtubes

ZHU Weiyao¹, ZHU Xiaoyang¹, CAO Mengjing¹, ZHANG Xueling², YU Mingxu¹

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

2. School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Abstract In view of the narrow pore and throat and complex pore structure characteristics of low permeability reservoir, one-dimensional microtubes with inner diameters of 20, 15 and 10 μm are used to study the dynamic mechanism of fluid flow in microtubes. The relationship between flow velocity and pressure gradient are analyzed using nano-micron polymer as mobile media. Meanwhile, the flow mechanism of polymer nano-micron under microscale effect in the narrow throats are investigated, and the micro force and dynamic characteristic in the microtubes are revealed. The research shows that with the decrease of the microtube diameter, or the increase of nano-polymer particle size and solution concentration, the fluid flow velocity will decrease. The flow velocity of fluid in the microtube is proportional to the pressure gradient, but the nonlinear fluid flow characteristic will gradually stand up with the decrease of microtube diameter or the increase of nano-polymer particle size.

Keywords low permeability; microtubes; micro flow; nano-micron polymer

(责任编辑 刘志远)