

文章编号: 1673-5005(2009)01-0109-03

疏水纳米 SiO_2 对微管道流动特性的影响

狄勤丰^{1,2}, 李战华³, 施利毅^{1,2}, 吴非^{1,2}, 顾春元^{1,2}, 余祖斌^{1,2}

(1. 上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072; 2 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海 200072;
3 中国科学院 力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘要:通过微管道流动试验,探讨疏水纳米 SiO_2 的降压增注机理。在微尺度流动中,由于表面积/体积非常大,液固界面性质对流动有很大影响。在不同管壁界面条件下,用超纯水在内径约为 $25\ \mu\text{m}$ 的毛细管内进行流动特性试验。结果表明:相同压力下,经过油基疏水纳米 SiO_2 试剂处理后,水在微管中的流量有了较明显地提高;疏水纳米 SiO_2 吸附能够使微管管壁具有超疏水性,从而产生水流滑移效应,达到减阻增流效果。

关键词:微管道; 疏水纳米 SiO_2 ; 滑移效应; 减阻; 微流动试验

中图分类号: TE 348 **文献标识码:** A

Effect of hydrophobic nanoparticles SiO_2 on flow characteristics in microchannel

DI Qin-feng^{1,2}, LI Zhan-hua³, SHI Li-yi^{1,2}, WU Fei^{1,2}, GU Chun-yuan^{1,2}, YU Zu-bin^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2 Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy and Environment Engineering, Shanghai 200072, China;
3 State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The mechanism of decompression and augmented injection with hydrophobic nanoparticles SiO_2 adsorbing method was studied based on microchannel flow experiments. Due to the large ratio of surface area and volume in microscale flow, the property of liquid-solid interface has a considerable effect on the flow. The flow characteristics experiment was done using ultrapure water through a capillary with inner diameter of near $25\ \mu\text{m}$ under the different boundary conditions of the microchannel wall. The results show that the flow rate of water was increased considerably due to the reduction of flowing resistance under the same pressure in the microchannel absorbed by oil based hydrophobic nanoparticles SiO_2 . The wettability of microchannel wall was transformed from hydrophilicity into stronger hydrophobicity, then the slip effect appears and the flow resistance was reduced.

Key words microchannel; hydrophobic nanoparticles SiO_2 ; slip effect; reduction of flowing resistance; microflow experiment

在低渗透油田的石油资源开采中,利用纳米技术改善地层孔道的阻力特性,可以实现降低注水压力、提高注水量的目的,这是一种新兴的、尚处于机理探索阶段的物理法提高采收率技术。2000年中石化从俄罗斯引进了纳米 SiO_2 增注技术,在胜利油田和中原油田等进行了 12 口井的现场试验和应用,取得了成功^[1-2]。随后的自行研发产品则由于机理不明确,现场试验只有部分有效。至今,纳米 SiO_2

降压增注技术的机理还没有得到明确认识,并引起了一定范围内的争论。为此,笔者开展系统的机理研究工作,并提出纳米吸附法改变岩心微孔道孔壁表面润湿性,产生水流滑移边界层,继而降低水流阻力的新观点^[3-6]。近年来,微流动研究^[7-8]引起了科研工作者的兴趣,微管道的流动是微流动中最基本的一种流动问题。对于微尺度液体流动,目前认为流动特性仍符合 N-S 方程,但在应用 N-S 方程时,管

收稿日期: 2008 - 10 - 20

基金项目: 国家自然科学基金(50674065); 国家 863 计划项目(2008AA06Z201); 上海市科委重点科技攻关计划(071605102); 上海市教委科研创新项目(08ZZ45); 上海大学创新基金

作者简介: 狄勤丰(1963 -),男(汉族),江苏溧阳人,教授,博士,博士生导师,主要从事石油工程与工程力学等方面的教学和科研工作。

道内的流动滑移、粗糙度、黏性耗散、可压缩性等效应也会比宏观情况下更加显著。随着微流动的特征尺度越来越小,边界滑移^[9-11]现象日益突出,在工程实践中也越发受到重视。笔者通过微管道流动试验,探究疏水纳米 SiO_2 颗粒在管壁吸附后对水在微管道中流动特性的影响。

1 液体在微圆管内流动的经典理论模型

对于液体在微管道中的流动,当液体作低速流动时,微管道中的流动相应的雷诺数 Re 较小,一般属于层流流动。由于液体的压缩性小,可以认为是不可压缩流动。

如果微管道中液体流动仅仅是由压力梯度推动的平行流动,这就是 Hagen-Poiseuille 流,其流动方程为

$$\nabla p = \mu \nabla^2 U. \tag{1}$$

式中, p 为管端压降, Pa; μ 为流体的动力黏度系数, Pa·s; U 为流体平均速度, m/s

如果圆管直径为 d , 测量段长度为 L , 由方程(1)可推导出速度 U 及流量 Q 与压力 p 的关系为

$$U = \frac{d^2}{32\mu L} p. \tag{2}$$

$$Q = U \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^4}{128\mu L} p \tag{3}$$

2 试验方案及测量方法

2.1 试验用纳米试剂

试验用纳米试剂为粒径介于 10~30 nm 的 SiO_2 粉体,宏观上表现为一种无毒、无味、无污染的白色粉末,表面存在不饱和键和不同键合状态的羟基,表面羟基超过 40%。纳米 SiO_2 具有较强的疏水亲油特性。试验液体为纳米颗粒分散在柴油中的油基分散液,质量浓度为 1.5 g/L。

2.2 试验内容

由于用柴油作为纳米分散液,因此用柴油进行对比试验。在相同的环境条件下,分别测试了不同压力下毛细管在未经处理、经柴油处理和经纳米柴油液处理 3 种条件下的水在微管中流动的流量(这里的“处理”是指采用柴油或纳米油液驱替微管,然后静置)。

2.3 试验装置

试验装置为中科院力学所的微流动试验平台,如图 1 所示。该装置主要包括压力源及压力调控系

统、压力和温度测量系统、微圆管试验段和流量测量系统。高压氮气瓶可提供 0~15 MPa 的压力,经过气压调节阀降压和气体净化装置,得到纯净的低压氮气。由于试验用压力较低,因此压力调节分两步完成,先由压力传感器进行粗调,再由压力传感器进行精细调节。试验用微管采用标准毛细管,标称内径 25 μm ,微圆管内表面平均粗糙度不超过 0.3%,一端与测压三通连接。压力传感器和温度探头连接在微管入口处的三通上,当气压接通后,推动储液管中的流体进入微圆管试验段,将微管出口与内径为 1~2 mm 位移毛细玻璃管连接进行流量测量。位移管(毛细管)的下游端不封闭,直通大气。

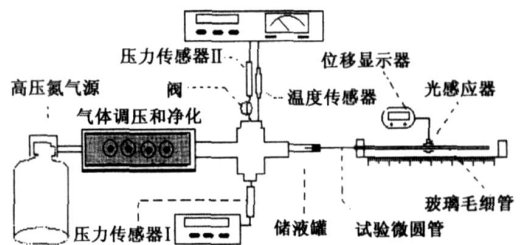


图 1 微流动试验平台示意图

Fig 1 Sketch of microflow experimental platform

2.4 测量方法

2.4.1 压力测量

微管试验段入口端的压力为驱替压力,由传感器读取,精度为 5%。在试验过程中,根据情况设定压力值。将压力调整到预设的值,等压力值稳定后进行压力数据记录和流量测试。

2.4.2 流量测量

试验中设定入口压力,采用 Cui 等^[12]的位移法测量一定压力下流过微管的体积流量,即用微量注射器在液柱内注入一个气泡,以气泡的边缘为基准面,通过光电接收装置来测量液柱位移和时间,见图 2。选择 4 个压力点,由低到高再由高到低进行测量,保证试验结果的稳定性和可重复性。

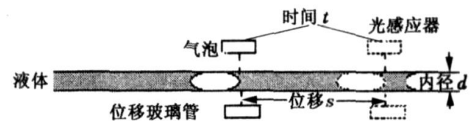


图 2 位移法流量测量示意图

Fig 2 Sketch of flow measurement by displacement method

2.5 试验步骤

- (1) 截取一段微管,测量未处理时不同压力下的水流量;
- (2) 将柴油驱入微管,干燥后,用水驱替,测试

不同压力下的流量;

(3)用纳米柴油液驱替,然后静置 24 h,用水驱替,测量不同压力下的流量;

(4)进行数据处理,比较不同条件下的流量与压力关系的变化趋势。

3 试验结果及其分析

3.1 试验 1

第一组试验采用管长 67.24 mm、标称管径 25

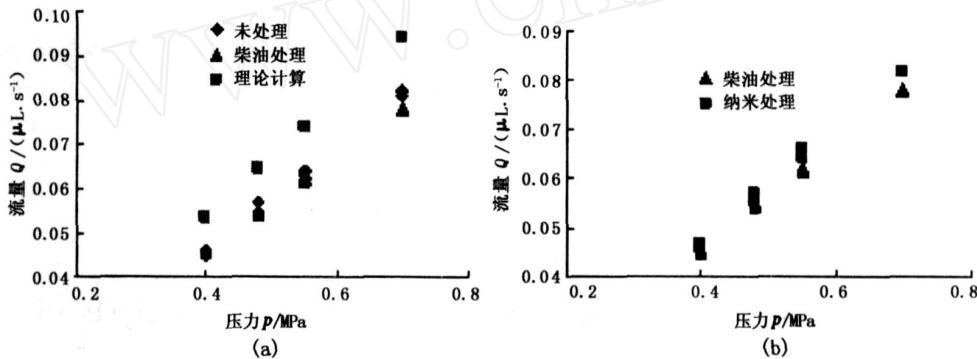


图 3 1#管流量 压力关系曲线

Fig 3 Flow-pressure diagram of NO. 1 m microchannel

3.2 试验 2

考虑到管的长度较短使得纳米产生的累积效应不明显,第二组试验采用管长 115.73 mm、标称管径 25 μm 的 2#管。试验结果见图 4。

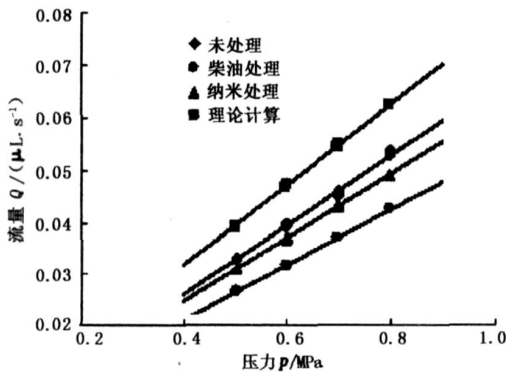


图 4 2#管流量 压力关系曲线

Fig 4 Flow-pressure diagram of NO. 2 m microchannel

从图中可以看出,未处理的实测值与理论值存在的差异与试验 1 相近,微管在驱替过柴油后,水的流量减小;驱替油基纳米试剂并静止 24 h 后,水的流量又相应增加。在微管长度增加的情况下,这种变化比较明显。

3.3 试验分析

(1)试验均采用压力由低到高再由高到低的测量方法,在相同压力点流量数据非常吻合,说明系统

μm 的 1#管。试验结果见图 3。从图 3 (a)可以看出,未处理的实测值与理论值有一定差异,但基本趋势一致,说明微管实际管径与标称值有一定差异,但考虑到是在同一根微管内进行试验,不影响比较不同液体处理后的流量变化。

微管在柴油驱替后,水的流量略有减小,说明柴油有一定的影响。

从图 3 (b)中可以看出,相同压差下,微管在纳米柴油液处理后水的流量比在柴油处理后略有增加。

具有良好的稳定性和可重复性。

(2)未处理的微管实测值与理论值存在一定差异,而两组试验的差异趋势基本相同,分析认为微管的实际有效管径与标称值存在偏差。

(3)与未处理相比,柴油处理后,流量明显减小,分析认为由于柴油具有较高的黏度,与毛细管具有一定的黏附力,在内壁形成一层油膜,从而使微管有效内径减小。由式 (3)可知,流量与管径的 4 次方成正比,流量对管径非常敏感,内径减小,流量明显下降。

(4)在纳米柴油液驱替后,微管有效管径减小,但流量却有所增加。分析认为由于纳米颗粒的吸附,使管壁的表面润湿性转变为超疏水性,产生水流滑移效应,有效地提高了水的流量。在微管长度增加时,纳米产生的累积效果更加明显。

4 结束语

微管在柴油驱替后有效管径减小,从而使水的流量减小;在油基纳米试剂驱替后,由于纳米颗粒在管壁的吸附形成滑移效应,能有效提高水的流量,反映出纳米颗粒吸附微管管壁后,对水在微管中的流动有减阻作用。这进一步论证了纳米吸附法改变岩心微孔道孔壁表面润湿性,产生水流滑移边界层,继而降阻增流的观点。

(下转第 119 页)

- [4] 张效羽. 套管有限元计算的若干问题分析 [J]. 天然气工业, 2001, 21 (1): 62-65.
ZHANG Xiao-yu. Analysis of some problems in casing calculation by finite element method [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21 (1): 62-65.
- [5] 何开平, 张良万, 张正禄, 等. 盐层蠕变粘弹性流体模型及有限元分析 [J]. 石油学报, 2002, 23 (3): 102-106.
HE Kai-ping, ZHANG Liang-wan, ZHANG Zheng-lu, et al. Viscous and elastic flow module for gypseous salt creep and finite element analyses [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23 (3): 102-106.
- [6] 杨春和. 深层岩石本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (10): 1678-1682.
YANG Chun-he. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (10): 1678-1682.

(编辑 沈玉英)

(上接第 111 页)

参考文献:

- [1] 陆先亮, 吕广忠, 栾志安, 等. 纳米聚硅材料在低渗透油田中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (6): 110-122.
LU Xian-liang, LÜ Guang-zhong, LUAN Zhi-an, et al. Application of polysilicon in low permeability oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30 (6): 110-122.
- [2] 苏咸涛, 闫军, 吕广忠, 等. 纳米聚硅材料在油田开发中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2002, 24 (3): 48-51.
SU Xian-tao, YAN Jun, LÜ Guang-zhong, et al. Application of nanometer polysilicon in oil field development [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24 (3): 48-51.
- [3] 狄勤丰, 顾春元, 施利毅, 等. 疏水性纳米 SiO_2 增注剂的降压作用机理 [J]. 钻采工艺, 2007 (4): 91-94.
DI QIN-feng, GU Chun-yuan, SHI Li-yi, et al. Pressure drop mechanism of enhancing water injection technology with hydrophobicity nanometer SiO_2 [J]. Drilling & Production Technology, 2007 (4): 91-94.
- [4] GU Chun-yuan, DI QIN-feng, FANG Hai-ping. Slip velocity model of porous walls absorbed by hydrophobic nanomaterial SiO_2 [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007 (3): 365-371.
- [5] LI DING, DI QIN-feng, LI JING-yuan, et al. Large slip length over a nanopatterned surface [J]. Chinese Physics Letter, 2007, 24 (4): 1021-1024.
- [6] 吴非, 狄勤丰, 顾春元, 等. 疏水纳米 SiO_2 降低岩心流动阻力效果的室内实验研究 [J]. 钻采工艺, 2008, 31 (2): 102-112.
WU Fei, DI QIN-feng, GU Chun-yuan, et al. Experimental study on the reduction of flowing resistance through rock microchannel with nanoparticles SiO_2 adsorbing method [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31 (2): 102-112.
- [7] HO Chih-ming, TAI Yu-chong. Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows [J]. Annu Rev Fluid Mech, 1998, 30: 579-612.
- [8] GORDANO N, CHENG J-T. Microfluid mechanics: progress and opportunities [J]. J Phy: Condens Matter, 2001, 13: 271-295.
- [9] GRANICK S, ZHU X, HYUNJUNG L. Slippery questions about complex fluids flowing past solids [J]. Nature Materials, 2003, 2: 221-227.
- [10] THOMPSON P A, TROIAN S M. A general boundary condition for liquid flow at solid surfaces [J]. Nature, 1997, 389: 360-362.
- [11] CHOI Chang-hwan, JOHAN K A, WESTN, et al. Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels [J]. Physics of Fluids, 2003, 15 (10): 2898-2902.
- [12] CU I Hai-hang, LI Zhan-hua. Flow characteristics of liquids in microtubes driven by a high pressure [J]. Physics of Fluids, 2004, 16: 1803-1810.

(编辑 沈玉英)

(上接第 114 页)

- [8] 李兰冬, 章福祥, 关乃佳, 等. 金属-ZSM-5/堇青石整体式催化剂上稀燃汽车尾气的净化 [J]. 催化学报, 2006, 27 (1): 41-44.
LI Lan-dong, ZHANG Fu-xiang, GUAN Nai-jia, et al. Metal-ZSM-5/Cordierite monolithic catalysts for purifying lean-burn engine exhaust [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2006, 27 (1): 41-44.
- [9] STEPHEN James Comelius. Modeling and control of automotive catalysts [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2001.
- [10] LI Lan-dong, CHEN Ji-xin, ZHANG Shu-juan, et al. Selective catalytic reduction of nitrogen oxides from exhaust of lean burn engine over in-situ synthesized Cu-ZSM-5/Cordierite [J]. Environment Science Technology, 2005, 39: 2841-2847.
- [11] 冯洪庆. 465 汽油机稀薄燃烧及 NO_x 排放催化控制研究 [D]. 天津: 天津大学机械学院, 2003.

(编辑 沈玉英)