

文章编号:1000-4092(2019)02-267-04

致密储层纳米流度改性剂的微流控模拟评价*

耿向飞¹, 丁彬¹, 张玉亮², 王哲¹, 郭建辰², 肖川³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 新疆油田分公司物资供应总公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:为克服常用注入液体性能评价方法的不足,同时实现对致密储层注入液体驱油过程的有效评价,通过自主设计的3种微流控模型(2维多孔介质模型、2.5维孔喉模型和半圆多通道模型)对研发的致密储层纳米流度改性剂开展了驱油性能的在线、可视模拟评价研究。结果表明,纳米流度改性剂可显著降低注水启动压力,比水更易进入小孔隙,并可快速将原油分割为小油滴,大幅提高原油的流度与运移能力,驱油效率高达90%以上,可用于致密储层的高效开发。图22参12

关键词:致密储层;流度改性剂;微流控;驱油效率

中图分类号:TE349;TE327;TE357.46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2019.02.015

我国致密油远景资源量达70亿吨左右,其中技术可采资源量为20~25亿吨,占全球致密油资源总量的9.3%,主要分布在松辽、鄂尔多斯、四川、准噶尔等盆地^[1]。我国致密储层渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为6%~15%,2~10 μm 的微米级孔隙是主要储油空间。与特低/超低渗油藏相比,其成藏机理复杂、孔喉细小、开发难度大^[2],对注入液体的性能要求高。目前评价注入液体性能的方法主要有岩心驱替实验、低场核磁共振分析等,评价效果较好,对现场应用也起到了一定的指导作用。但这些方法存在操作复杂、样品消耗大、可视化程度低、重复性差等问题,因此,亟需新的模拟手段来实现对致密储层注入液体体系的有效评价。

微/纳流控技术是一种在微/纳米尺度空间对流体进行操控的科学技术,具有将生物、化学等实验室的基本功能微缩到一个几平方厘米芯片上的能力,因此又被成为芯片实验室^[3-5]。2004年美国Business 2.0杂志一篇封面文章把芯片实验室列为“改变未来的七种技术之一”。近年来,微/纳流控技术在石油行业也得到了广泛应用。Calgary大学采

用自制的微流控芯片评价了水、纳米流体、复合流体、表面活性剂对加拿大Alberta重油的采收率^[6];斯伦贝谢公司新型“微流控芯片PVT测量技术”已广泛应用于现场油藏储层流体测试,应用最高压力可达到86 MPa^[7];Cornell大学通过微流控芯片研究了通道尺寸对流体性质的影响,发现在纳米孔道中水的黏度会增大^[8-10]。本文采用自主设计的3种微流控模型(2维多孔介质模型、2.5维孔喉模型和半圆多通道模型)对研发的致密储层纳米流度改性剂开展了驱油性能的在线、可视模拟评价研究。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

储层纳米流度改性剂,由双子表面活性剂、助溶剂、油溶性解缔合剂按照比例自制;模拟原油,新疆吉木萨尔原油与煤油按体积比10:4混合,黏度(50℃)为63.4 mPa·s;煤油、苏丹红、亚甲基蓝,上海阿拉丁试剂公司;蒸馏水。

微纳米尺寸驱替平台,莱卡M165FC集光学显微镜、CCD成像和微流控芯片专用夹具于一体,中

* 收稿日期:2018-12-11;修回日期:2019-04-20。

作者简介:耿向飞(1988-),女,工程师,西南石油大学应用化学专业博士(2015),从事油田化学方面的研究,通讯地址:100083北京市海淀区学院路20号910信箱油田化学研究所,电话:010-83595500, E-mail: gengxf@petrochina.com.cn。

国石油大学(北京)自主搭建设备;2维多孔介质模型:玻璃材质,模型尺寸 $1.5\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$,模拟1/4五点法井网,深度 $15\text{ }\mu\text{m}$,最大宽度 $167\text{ }\mu\text{m}$,最小宽度 $30\text{ }\mu\text{m}$,见图1;2.5维孔喉模型:玻璃材质,模型尺寸 $1.5\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$,模拟1/4五点法井网,孔隙深度 $15\text{ }\mu\text{m}$,喉道深度 $2\text{ }\mu\text{m}$,见图2;半圆多通道模型:玻璃材质,模型尺寸 $1.5\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}$,主要构成为:1 mm注液通道,300 μm 排液通道,7条深度为 $1\text{ }\mu\text{m}$,宽度分别为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、 $80\text{ }\mu\text{m}$ 、 $160\text{ }\mu\text{m}$ 的微流控通道,7条微流控通道与供给区域为直径10 mm的圆和宽度为1 mm的排液通道相通,7条微通道的排布方式是为了避免分布位置对流动规律产生影响,因此将宽通道和窄通道交错开,并对称分布,见图3。

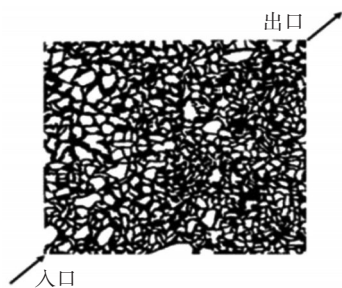


图1 2维多孔介质模型(饱和油状态)

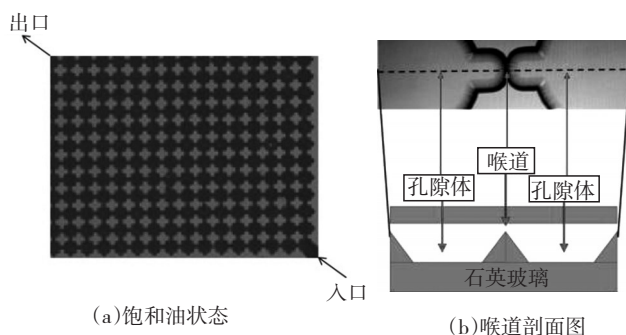


图2 2.5维孔喉模型

1.2 实验方法

(1)2维多孔介质与2.5维孔喉模型驱油模拟实验
首先将模型饱和模拟原油,之后依次进行水驱油和纳米流度改性剂驱油,纳米流度改性剂水溶液质量分数为0.1%,驱替速率均为 100 nL/min ,驱替结束后通过软件计算驱油效率。

(2)半圆多通道模型驱油模拟实验

将模型饱和苏丹红染色的煤油,在恒压(0.005

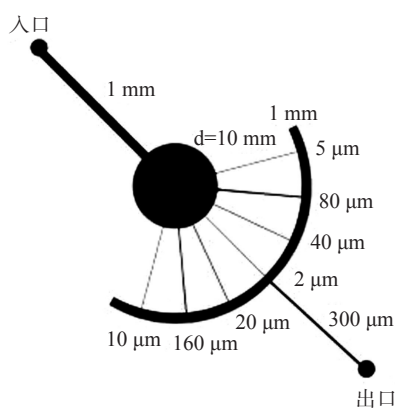


图3 半圆多通道模型示意图

MPa)下注入亚甲基蓝染色的蒸馏水或0.1%的纳米流度改性剂水溶液,待其充满圆形供给区域后,逐步提升压力,观察微通道的通过情况,并记录液体通过每个微通道进入排液通道时的注入压力。

2 结果与讨论

2.1 2维多孔介质模型驱油

2维多孔介质模型水驱油结束、纳米流度改性剂驱油过程以及纳米流度改性剂驱油结束时的显微镜照片见图4。水驱驱油效率较低,大部分含油区域未波及,存在指进现象,经计算水驱结束后驱油效率仅为35%。后续注入纳米流度改性剂后,原油被瞬间转化为小尺寸油滴,最小的油滴尺寸可到百纳米级,从而大幅提高了原油的流动性,扩大了波及体积,提高了驱油效率。纳米流度改性剂驱结束后的驱油效率可达90%。

2.2 2.5维孔喉模型驱油

2.5维孔喉模型水驱油结束、纳米流度改性剂驱油过程以及纳米流度改性剂驱油结束时的显微镜照片见图5。2.5维孔喉模型驱油结果与2维多孔介质模型部分相似,水驱驱油效率较低,约为40%;后续注入纳米流度改性剂后,原油被瞬间转化为小尺寸油滴,最小的油滴尺寸可到百纳米级,更多的原油通过狭窄的喉道,驱油效率可达95%。

2.3 半圆多通道模型驱油

2.3.1 水驱油

0.055 MPa压力下水依次突破 $80\text{ }\mu\text{m}$ 、 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、 $160\text{ }\mu\text{m}$ 的微通道,见图6(a)、6(b)和6(c);当压力升高至0.06 MPa时,水突破 $20\text{ }\mu\text{m}$ 微通道,见图6(d);当压力升高至0.1024 MPa时,水依次突破 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$ 微通

道, 见图 6(e) 和 6(f)。

2.3.2 纳米流度改性剂驱油

0.025 MPa 压力下纳米流度改性剂依次突破 80 μm 和 160 μm 的微通道, 见图 7(a) 和 7(b); 当压力升高至 0.035 MPa 时, 纳米流度改性剂突破 20 μm 微通道, 见图 7(c); 当压力升高至 0.05 MPa 时, 纳米流度改性剂突破 40 μm 微通道, 见图 7(d); 当压力升高至 0.075 MPa 时, 纳米流度改性剂突破 5 μm 微通

道, 见图 7(e); 当压力升高至 0.1024 MPa 时, 纳米流度改性剂突破 2 μm 微通道, 见图 7(f)。

对比半圆多通道模型水驱油和纳米流度改性剂驱油结果, 可以看出, 纳米流度改性剂比蒸馏水更容易进入各个微通道, 所需注入压力均有所降低。说明纳米流度改性剂可显著降低注水启动压力, 比水更易进入小孔隙, 有望助力致密油的高效开发。结合 2.1 和 2.2 节实验结果, 这可能是由于纳

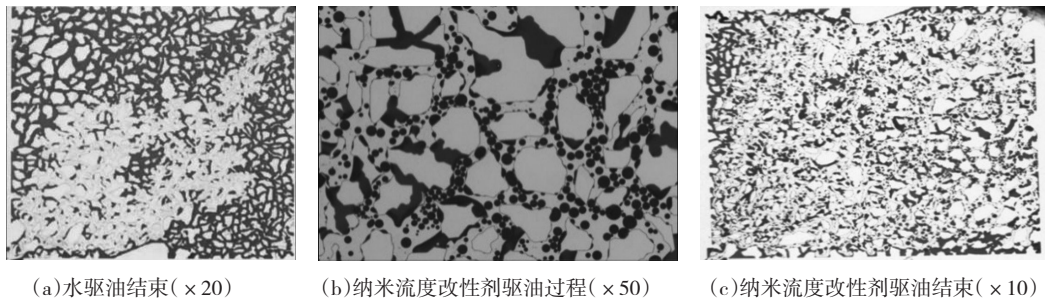


图 4 2 维多孔介质模型驱油过程

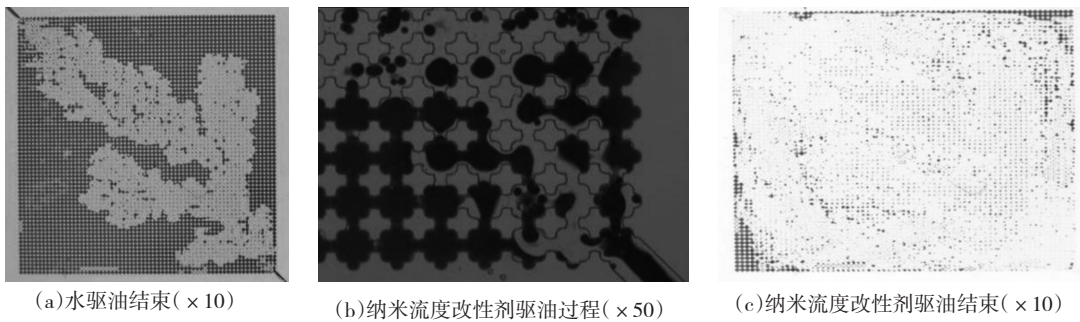


图 5 2.5 维孔喉模型驱油过程

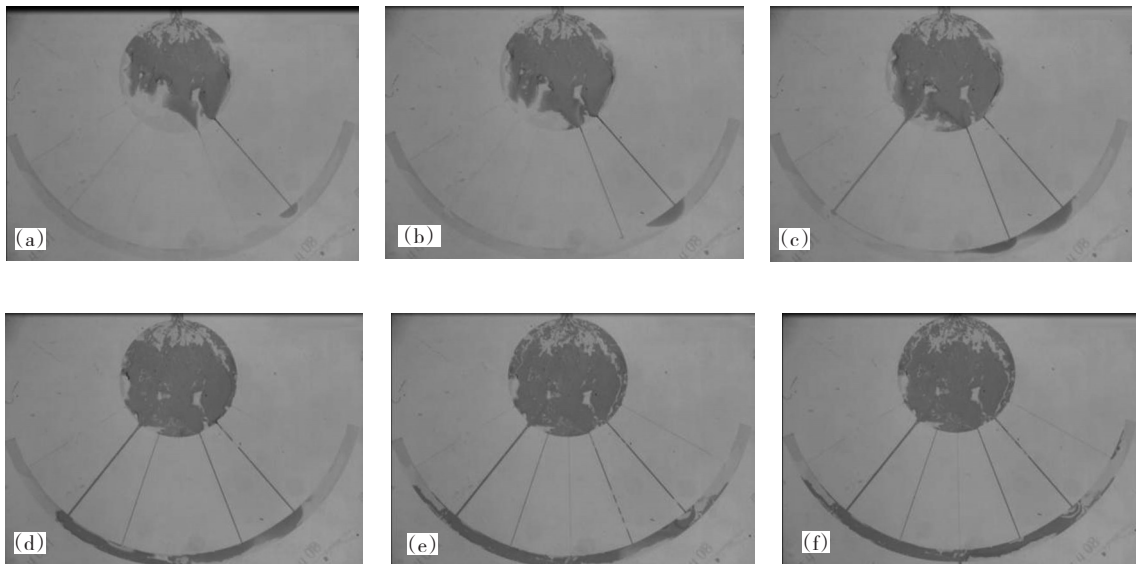


图 6 不同压力下半圆多通道模型水驱油突破通道过程 ($\times 50$)

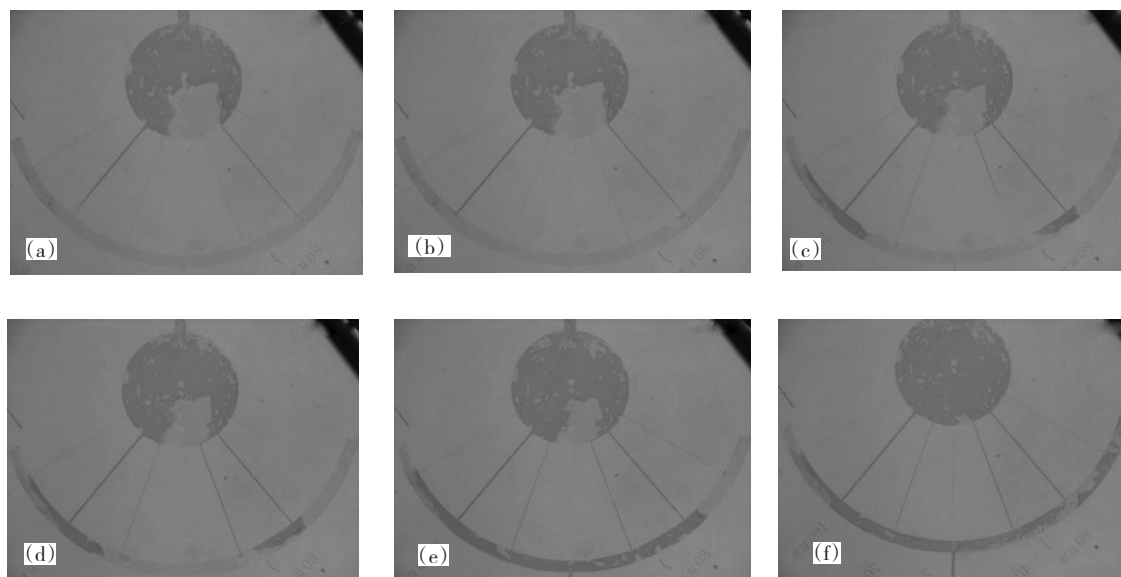


图7 不同压力下半圆多通道模型纳米流度改性剂驱油突破通道过程($\times 50$)

米流度改性剂可将原油分割为小油滴,使得原油的流度与运移能力大幅度提高,从而扩大波及体积和提高驱油效率。

致密储层矿物成分复杂,分布具有随机性,岩石孔隙表面的润湿性是不均匀的,中国典型致密油区总体润湿性多为弱亲水或弱亲油^[2]。尺寸、构造和表面性质是致密储层渗流通道模拟的关键因素,设计制作“高仿”的致密储层模型以及修饰有智能传感的仿生微纳米孔道,是未来对驱油剂评价、驱油剂渗流机理以及驱油机理研究的重要发展方向。本文的3种微流控模型均为亲水性,下一步将制作具有不同润湿性的微流控模型,实现对纳米流度改性剂及其他驱油剂驱油机理和驱油效果的全面评价。

3 结论

采用自主设计的3种微流控模型(2维多孔介质模型、2.5维喉道模型和半圆多通道模型)对研发的致密储层纳米流度改性剂开展了驱油性能的在线、可视模拟评价研究。纳米流度改性剂可将原油分割为小油滴,大幅提高原油的流度与运移能力,并可显著降低注水启动压力,比水更易进入小孔隙,驱油效率高达90%以上,有望助力致密油的高效开发。

参考文献:

[1] 邹才能,杨智,朱如凯,等.中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J].地质学报,2015,89(6):979-1007.

- [2] 邹才能,丁云宏,卢拥军,等.“人工油气藏”理论与实践[J].石油勘探与开发,2017,44(1):144-154.
- [3] 林炳承,秦建华.微流控芯片实验室[M].北京:科学出版社,2006:54-90.
- [4] 林炳承,秦建华.图解微流控芯片实验室[M].北京:科学出版社,2012:40-60.
- [5] 李战华,吴健康,胡国庆,等.微流控芯片中的流体流动[M].北京:科学出版社,2008:55-61.
- [6] PARISA B, IAN D G, AMIR S N, et al. Silica-based nanofluid heavy oil recovery a microfluidic approach [C].//SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. Calgary, 2017, SPE-185008-MS.
- [7] SHAHNAWAZ M, FARSHID M. Microfluidic platform for PVT measurements [C].//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Amsterdam, 2014, SPE-170910-MS.
- [8] MARIO C, STEPHEN W P, TRUNER M, et al. Entropic recoil separation of long DNA molecules [J]. Anal Chem, 2002, 74(20):6170-6176.
- [9] MOIRÉ M, PEYSSON Y, PANNACCI N, et al. A new microfluidic tensiometer for optimizing EOR formulations [C].//SPE Improved Oil Recovery Conference. Oklahoma, 2016, SPE 179557-MS.
- [10] HE Kai, XU Liang, YIN Xiaolong, et al. A rock-on-a-chip approach to study fluid invasion and flowback in liquidsrich shale formations [C].//SPE Oklahoma Oil and Gas Symposium. Oklahoma, 2017, SPE-185088-MS.
- [11] 丁彬,罗健辉,耿向飞,等.基于低场核磁共振技术的岩心内流体“可视化”评价方法研究[J].油田化学,2018,35(1):170-175.
- [12] 耿向飞,罗健辉,丁彬,等.低渗透油藏毛细作用评价方法研究[J].油田化学,2017,34(4):717-720.

(下转第276页。to be continued on p.276)

Performance Evaluation and Application of Pressure-lowering and Injection-increasing Agent in Low Permeability Reservoir of Jidong Oilfield

LIU Jing^{1,2}, LIU Yi^{1,2}, LI Liangchuan^{1,2}, WANG Jinzhong^{1,2}, ZHANG Xia^{1,2}, TANG Cong^{1,2}

(1. Drilling and Production Technology Research Institute, Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063002, P R of China; 2. Key Laboratory of Oilfield Chemistry, CNPC, Beijing 100083, P R of China)

Abstracts: Aiming at the problems of rapid rising of water injection pressure and under-injection during the process of water injection in Gaoshangpu oilfield, a cationic-nonionic surfactant and pressure-lowering and injection-increasing agent JDZC was designed through the physical characteristics of low permeability reservoir in Jidong oilfield. The effects of JDZC dosage on surface tension, oil-water interfacial tension and emulsifying ability, and the temperature resistance, pressure-lowering and injection-increasing ability of JDZC were studied. Finally, JDZC was applied in the field. The results showed that the temperature resistance of JDZC made from polyoxyethylene ether nonionic surfactant and rosin-based triquatary ammonium salt could reach 130°C. With the increase of JDZC dosage, the surface tension of JDZC solution decreased and stabilized gradually. The surface tension of 500 mg/L JDZC solution was 28 mN/m. The critical micelle concentration of JDZC solution prepared with injected water in Jidong oilfield was 1000 mg/L. The minimum interfacial tension between 500—5000 mg/L JDZC solution and Jidong crude oil was maintained in the order of 10^{-2} mN/m. The emulsifying ability of JDZC to crude oil was good, and the larger the dosage, the stronger the emulsifying ability was. JDZC had obvious effect of reducing pressure and increasing injection for the core of Gaoshangpu main formation. The permeability of core after washing increased by 40% and the pressure decreased by 26%. The field application results of 38 wells showed that the field implementation efficiency was 94%, the initial injection pressure of water injection wells decreased by 8.5 MPa on average, the validity period was more than half a year, and the average enhanced injection of single well was more than 2×10^3 m³, which improved the water injection problem of Gaoshangpu low permeability reservoir.

keywords: low permeability reservoir; pressure-lowering and injection-increasing; surfactant; Jidong oilfield

(上接第270页。continued from p.270)

Microfluidics Simulation Investigation of Nano Fluidity Modifier for Tight Reservoir

GENG Xiangfei¹, DING Bin¹, ZHANG Yuliang², WANG Zhe¹, GUO Jianchen², XIAO Chuan³

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, P R of China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Branch Company, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China; 3. Xinjiang Oilfield General Supply Corporation, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of common methods for evaluating the performance of injected fluids and realize the effective evaluation of the process of injected fluids flooding in tight reservoirs, three self made microfluidic models, including two dimensions porous media model, two and half dimensions throat model and semi-circle multichannel model, were used to online characterize the oil displacement property of nano fluidity modifier for tight reservoir. The results showed that the nano fluidity modifier could greatly decrease the water flooding start-up pressure and enter the smaller pore easier. The nano fluidity modifier divided the crude oil into smaller oil drop, thus significantly increased the fluidity and migration ability of crude oil with above 90% oil displacement efficiency, which could be expected to help the development of tight oil.

Keywords: tight reservoir; fluidity modifier; microfluidic; displacement efficiency