

Influence of Viscosity on Fluid Percolation Characteristic in Different Permeability Heavy Oil Reservoirs

Yunqian Long¹, Weiyao Zhu², Yang Xu³, Fuquan Song^{1*}, Hongyan Han²

¹Innovation Application Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan

²School of Civil & Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing

³China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang

Email: *fqsong2000@smmail.cn

Received: Apr. 25th, 2014; revised: May 23rd, 2014; accepted: May 30th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The viscosity abnormality caused by the asphaltenes and resins in heavy oil reflects the characteristics of heavy oil reservoirs and has very important influence on seepage rule of heavy oil. The oil samples containing different heavy oil ratio were prepared. The rheological properties of different viscosity oil sample and its flow characteristics in porous media were experimentally studied by the rheometer and the core displacement device. The effects of viscosity to percolation characteristic of heavy oil were analyzed in detail. The results show the non-Newtonian seepage characteristic of oil samples in porous media enhances with increasing the proportion of heavy oil in the oil samples. The smaller the permeability of the porous media, the non-Newtonian behavior of oil samples is more obvious. As the heavy oil ratio increases, the relative permeability of water increases rapidly and the oil relative permeability decreases sharply which become worse at the oil recovery effect. The influence on relative permeability of fluids in the lower permeability cores is more than high permeability ones. The water cut increases rapidly in the produced fluids with increasing the proportion of heavy oil in the oil sample. The lower the permeability of the cores, the water cut with recovery percent increases more rapidly.

Keywords

Viscosity, Heavy Oil Reservoirs, Percolation Characteristic, Two-Phase Seepage, Oil Displacement Efficiency

*通讯作者。

黏度对不同渗透率稠油油藏流体渗流特征的影响

龙运前¹, 朱维耀², 徐 洋³, 宋付权^{1*}, 韩宏彦²

¹浙江海洋学院, 创新应用研究院, 舟山

²北京科技大学, 土木与环境工程学院, 北京

³中国石油天然气管道工程有限公司, 廊坊

Email: [*fqsong2000@smail.cn](mailto:fqsong2000@smail.cn)

收稿日期: 2014年4月25日; 修回日期: 2014年5月23日; 录用日期: 2014年5月30日

摘 要

稠油中胶质、沥青质形成的结构造成的黏度异常反映了稠油油藏的特性, 对稠油的渗流特征有非常重要的影响。通过配制不同含稠油比例的油样, 利用流变仪和岩心驱替装置, 对不同黏度油样的流变性及其在多孔介质中的渗流特征进行了实验研究, 分析了黏度对稠油渗流特征的影响。结果表明: 随着油样中所含稠油比例增大, 多孔介质中油样的非牛顿渗流特性增强, 且渗透率越小, 油样的非牛顿特性表现越明显; 随着油样中稠油比例增大, 水相相对渗透率迅速增大, 而油相相对渗透率急剧降低, 导致开采效果变差, 且对流体在较低渗透率岩样中的相对渗透率影响大于高渗透率的岩样; 随着被驱替油样中稠油比例增加, 产出液中含水率上升的速度加快, 且渗透率越低, 含水率随采出程度增加的速度越快。

关键词

黏度, 稠油油藏, 渗流特征, 两相渗流, 驱油效率

1. 引言

我国稠油资源丰富, 探明和控制储量达 1640 Mt, 其中陆地稠油约占石油总资源的 20% 以上[1]。随着常规原油储量逐年递减, 稠油资源越来越受到广泛的关注[2] [3]。稠油与常规原油不同, 由于其黏度高、分子量大、极性大, 原油与岩石界面及原油之间界面的相互作用力大, 导致稠油在多孔介质中的渗流特征一般表现为非线性渗流[4]。黏度是最能反映稠油油藏特性的参数, 随着稠油黏度的变化, 稠油的渗流特性也将发生变化。从达西定律可知, 流体通过多孔介质的流量大小与流体黏度成反比。大量稠油流变性实验研究发现, 稠油中的胶质、沥青质形成的结构造成了稠油的黏度异常, 导致稠油油藏的采收率比常规原油油藏的采收率要低得多[5] [6]。Y. S. Wu 认为稠油地下渗流满足宾汉流体的渗流规律[7]。可见, 黏度对稠油的渗流特征有非常重要的影响。本文利用稠油跟煤油配制不同黏度的实验油样, 对含不同稠油比例的油样进行渗流特征方面的研究, 分析黏度对稠油油藏的渗流特征及驱油效果的影响, 为开发不同的稠油油藏提供科学的依据。

2. 实验部分

2.1. 试剂与仪器

实验设备包括德国 PHYSICA 公司的 MCR300 流变仪、驱替系统、温度控制系统、岩心夹持系统和

计量测试系统，实验前必须对流程进行密封实验。实验所用油样为三种，分别是：第一种为 100% 稠油，50℃时，黏度为 578.45 mPa·s；第二种为含 60% 稠油、40% 煤油，50℃时，黏度为 148.26 mPa·s；第三种为含 30% 稠油、70% 煤油，50℃时，黏度为 54.72 mPa·s；实验用水为地层水，水型为 CaCl₂ 型，总矿化度为 12,000 mg/L；实验所用岩样为天然岩心，直径为 2.5 cm，长度为 5 cm。

2.2. 实验方法

1) 流变特征实验

利用德国 PHYSICA 公司的 MCR300 流变仪分别对三种含不同稠油比例的油样进行相应流变实验测试，分别绘制剪切应力和表观黏度随剪切速率变化曲线，实验温度为 75℃。

2) 单相渗流实验

将岩心称干重，抽真空饱和地层水后，放入岩心夹持器，连接驱替设备；在实验温度 75℃下，以某一恒定的流速注入油样 5 PV 以上，直到岩心两端压力稳定，记录岩心两端的压力；然后增至下一流速，测量下一组数据，直到测出全部实验点，绘制压差与流量的关系曲线；实验中分别改变油样所含稠油比例和岩样渗透率，分析考察渗透率和油样黏度对油样单相渗流规律的影响。

3) 两相渗流实验

将岩心抽真空饱和地层水放入夹持器后，在实验温度 75℃下，以 1 mL·min⁻¹ 的速度向岩心中注入模拟油，建立束缚水，测定束缚水下的油相渗透率；以相同的速度向岩心中注入地层水，记录实验各个参数，直至出口端不出油为止，记录岩心的残余油饱和度，并测定残余油下的水相渗透率；绘制油水两相相对渗透率曲线，分析油水两相的相渗特征，计算水驱采收率，绘制含水率随采出程度变化的水驱特征曲线；实验中分别改变油样所含稠油比例和岩样渗透率，分析考察渗透率和油样黏度对油水两相渗流特征以及水驱特征曲线的影响。

3. 结果与讨论

3.1. 流变特征

不同稠油比例油样在 75℃条件下剪切应力随剪切速率变化曲线见图 1，表观黏度随剪切速率变化曲线见图 2。由图 1 可知，剪切应力与剪切速率基本成线性关系，表现为近似属于牛顿流体。当含 30%、60% 稠油的油样流变曲线线性拟合与实验数据曲线重合一致，但含 100% 稠油的油样流变曲线不是线性的，实验数据曲线与拟合直线不能重合，表现为拟塑性流体特征，说明原油属于弱拟塑性流体。而当油样不含 100% 稠油时流变曲线为牛顿流体特征，线性拟合重合较好。

由图 2 可知，油样表观黏度随剪切速率增大而减小，表现为剪切变稀流体。在剪切速率较小时，随着剪切速率增大黏度减小，油样表现为拟塑性流体；当剪切速率增大，黏度基本不变，油样表现为牛顿流体。油样含 100% 稠油时，曲线变化幅度大，非线性大，黏度随剪切速率变化大，拟塑性流体特征强。当油样含稠油 30%、60% 时，在剪切速率较小时，同样表现为拟塑性流体特征，当剪切速率增大也表现出牛顿流体特征。说明原油流变特征为拟塑性流体特征，油样随着含稠油比例降低，非牛顿流体特性减弱。

3.2. 单相渗流特征

黏度能够反映稠油油藏特性，同时对渗流状态也有重要影响，不同稠油比例油样在不同渗透率岩心中渗流规律曲线见图 3。由图可知，稠油在多孔介质中渗流具有以下特点：渗流曲线不通过原点，在压力低时，液体不流动；在驱替过程中，渗流曲线呈非线性变化，低渗透岩心中，曲线偏向驱替压力轴；

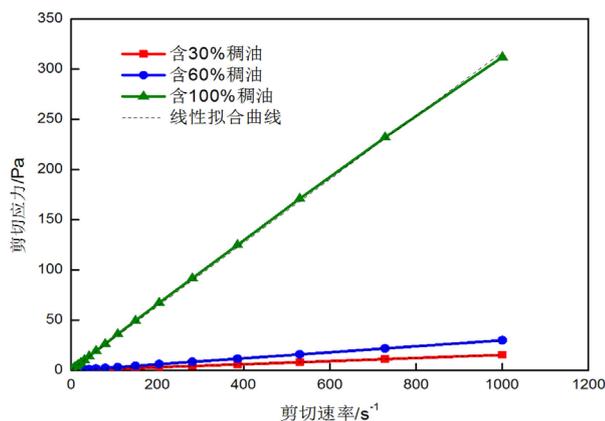


Figure 1. Variation curves of shear stress with shear rate for oil samples

图 1. 不同油样的剪切应力随剪切速率变化曲线

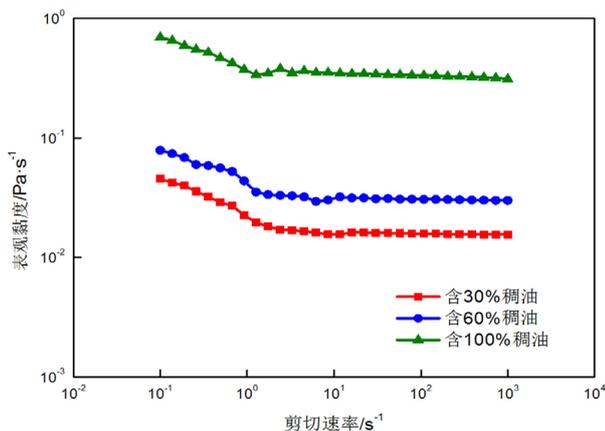


Figure 2. Variation curves of apparent viscosity with shear rate for oil samples

图 2. 不同油样的表观黏度随剪切速率变化曲线

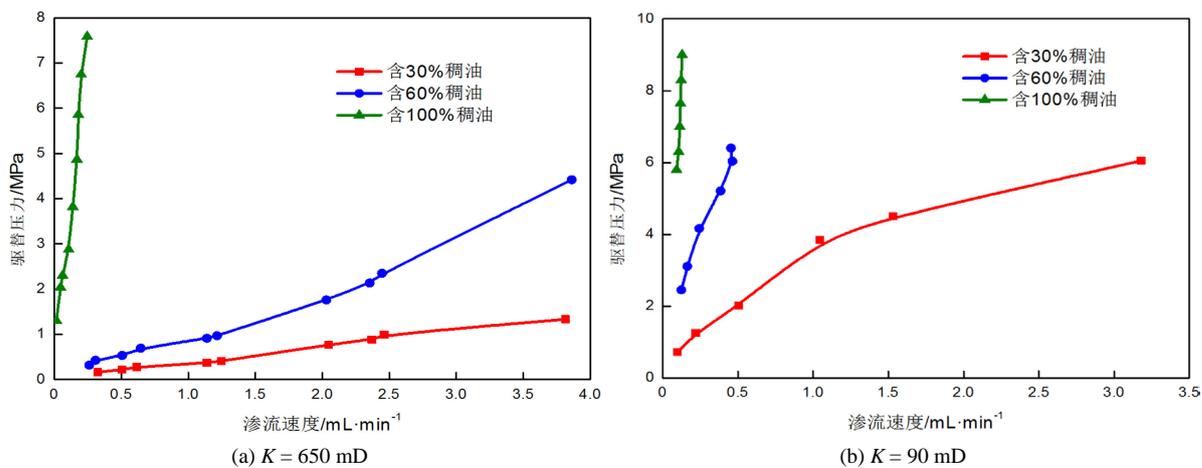


Figure 3. Variation curves of press difference with seepage velocity for oil samples in cores

图 3. 不同油样在岩心中压力差随渗流速度的变化曲线

高渗透岩心中，曲线偏向渗流速度轴；稠油的非牛顿流体特性受渗透率影响较大，渗透率越低，拟塑性

越强；当渗透率相同时，随着油样中所含稠油比例增大，渗流阻力增加，表现出明显非牛顿渗流特性，且渗透率越小，渗流阻力越大，岩心中稠油非牛顿特性亦表现越明显。

这是由于稠油在中低渗透多孔介质内渗流时，受液固界面剪切力作用，稠油结构破坏，表现出非牛顿流体特性，受渗透率影响较大，渗透率越低，渗流过程中驱替压力越大，拟塑性越强。此外，稠油具有剪切变稀性，在低渗透介质内，由于多孔介质对稠油剪切作用，原油结构破坏，压力增幅降低，渗流曲线偏向驱替压力轴，非牛顿现象显著；而在高渗透介质内，稠油粘弹性明显，随着流速增加，黏度增大，流动阻力增大，曲线偏向渗流速度轴。同时，稠油在多孔介质内流动时，受介质内毛管力和吸附边界层力的作用，稠油黏度越大，沥青质和胶质的含量越高，越易形成较大直径的沥青质微粒，从而表现出更强的结构力学特性，且沥青质微粒堵塞或吸附在管壁上，减小了多孔介质的有效尺寸，流动阻力增大[8]。

3.3. 两相渗流特征

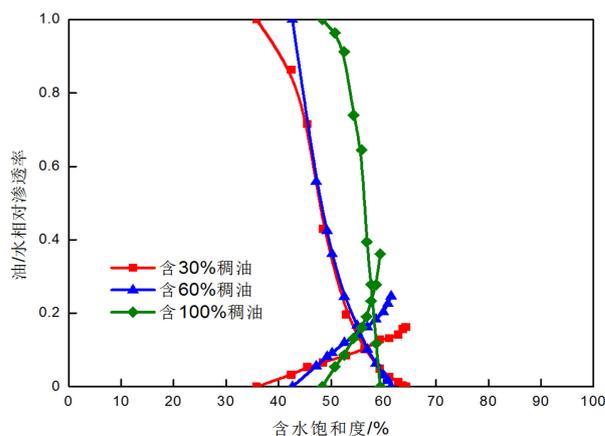
在油水两相流动过程中，流度比影响着油水在多孔介质中的两相渗流，决定着油藏的开采效果。由于稠油具有黏度高、油水流度比大的特点，稠油油藏的油水两相渗流规律较为复杂。为此，配制含不同稠油比例的油样，测定其在不同渗透率岩样中的相对渗透率曲线，实验结果见表1与图4。

由表1可知，在不同渗透率岩样中，随着油样中稠油比例增大，即随着油样黏度增大，岩心束缚水

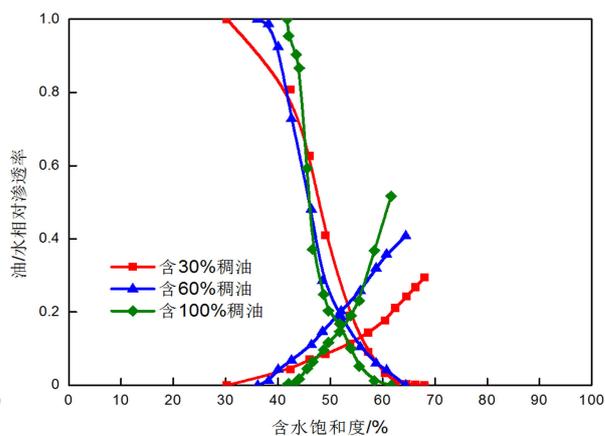
Table 1. Characteristic parameters of relative permeability curves during water driving oil in cores

表 1. 岩心水驱油相对渗透率曲线特征参数

方案	渗透率/mD	含稠油比例/%	束缚水饱和度/%	残余油饱和度/%	两相区宽度/%	最终采收率/%
1		30	28.25	30.98	40.77	56.78
2	2050	60	32.46	34.06	33.48	49.57
3		100	39.50	36.26	24.24	40.07
4		30	30.25	32.01	37.74	54.11
5	790	60	36.15	35.56	28.29	44.31
6		100	41.76	38.37	19.87	34.12
7		30	35.80	35.72	28.48	44.36
8	140	60	42.62	38.57	18.81	32.78
9		100	48.32	40.62	11.06	21.40



(a) $K = 140$ mD



(b) $K = 790$ mD

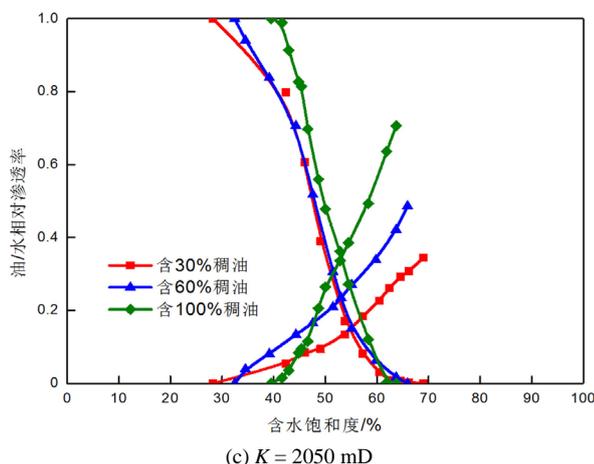


Figure 4. Oil-water relative permeability curves for oil samples in cores

图 4. 不同油样在岩心中的油水相对渗透率曲线

饱和度和残余油饱和度逐渐增大，两相区宽度和最终采收率逐渐降低。且岩样渗透率越低，束缚水饱和度和残余油饱和度越大，两相区宽度和最终采收率越低。当岩样渗透率约为 2050 mD 时，含稠油比例由 30% 提高到 100%，其束缚水饱和度和残余油饱和度分别提高了 11.25% 和 5.28%，两相区宽度和最终采收率分别降低了 16.53% 和 16.71%；而当岩样渗透率约为 140 mD 时，其束缚水饱和度和残余油饱和度分别提高了 12.52% 和 4.9%，两相区宽度和最终采收率分别降低了 17.42% 和 22.96%。

由图 4 可知，当岩样渗透率相近时，随着油样中稠油比例增大，束缚水饱和度发生明显的右移现象，两相流动区明显变窄，水相相对渗透率上升速度加快，而油相相对渗透率下降速度加快。说明随着油样黏度增大，岩样出口端一旦见水，水相相对渗透率迅速增大，而油相相对渗透率急剧降低，开采效果变差。且随着岩样渗透率降低，由油样黏度增大而引起的这种油相、水相相对渗透率的变化越发显著。说明随着油样黏度增大，即油样非牛顿特性变强，对流体在较低渗透率岩样中的相对渗透率影响较强，而对高渗透率的岩样影响相对较弱。引起这种现象的原因有两方面：一是随着油样黏度增大，沥青质形成的网状结构变多、变大，堵塞现象增多，表现油样的有效渗透率降低；二是油样黏度越大，多孔介质对其的吸附作用越明显，吸附层厚度增加，油相的相对渗透率变小[9]。

3.4. 水驱油特征

稠油的非牛顿特征和特殊的化学结构使其在储层中的渗流特征发生了变化，从而影响了稠油的开采效果。在不同渗透率岩样中进行不同黏度的稠油水驱实验，结果见表 1 与图 5。由表 1 可知，低黏度油样的水驱采收率明显高于高黏度油样的水驱采收率，且当油样黏度相同时，渗透率越大，采收率越高。

由图 5 可知，随着采出程度增大，产出液中的含水率迅速增大，且随着被驱替油样中稠油比例增加，产出液中含水率上升的速度加快。说明高黏油田开发初期含水率上升较快，而后期含水率上升逐渐变缓；而低黏油田在开发初期含水率上升较慢，后期含水率上升逐渐加快。这是因为油样中稠油比例越高，则水驱油的非活塞性越强；而油样中稠油比例越低，则水驱油的活塞性越强[10]。此外，随着岩样渗透率增大，含水率随采出程度增大的幅度降低，即渗透率越低，在驱替含不同稠油比例的油样时，含水率随采出程度增加的速度越快。

4. 结论

- 1) 低渗透岩心中，稠油渗流曲线偏向驱替压力轴，高渗透岩心中，曲线偏向渗流速度轴；稠油的非

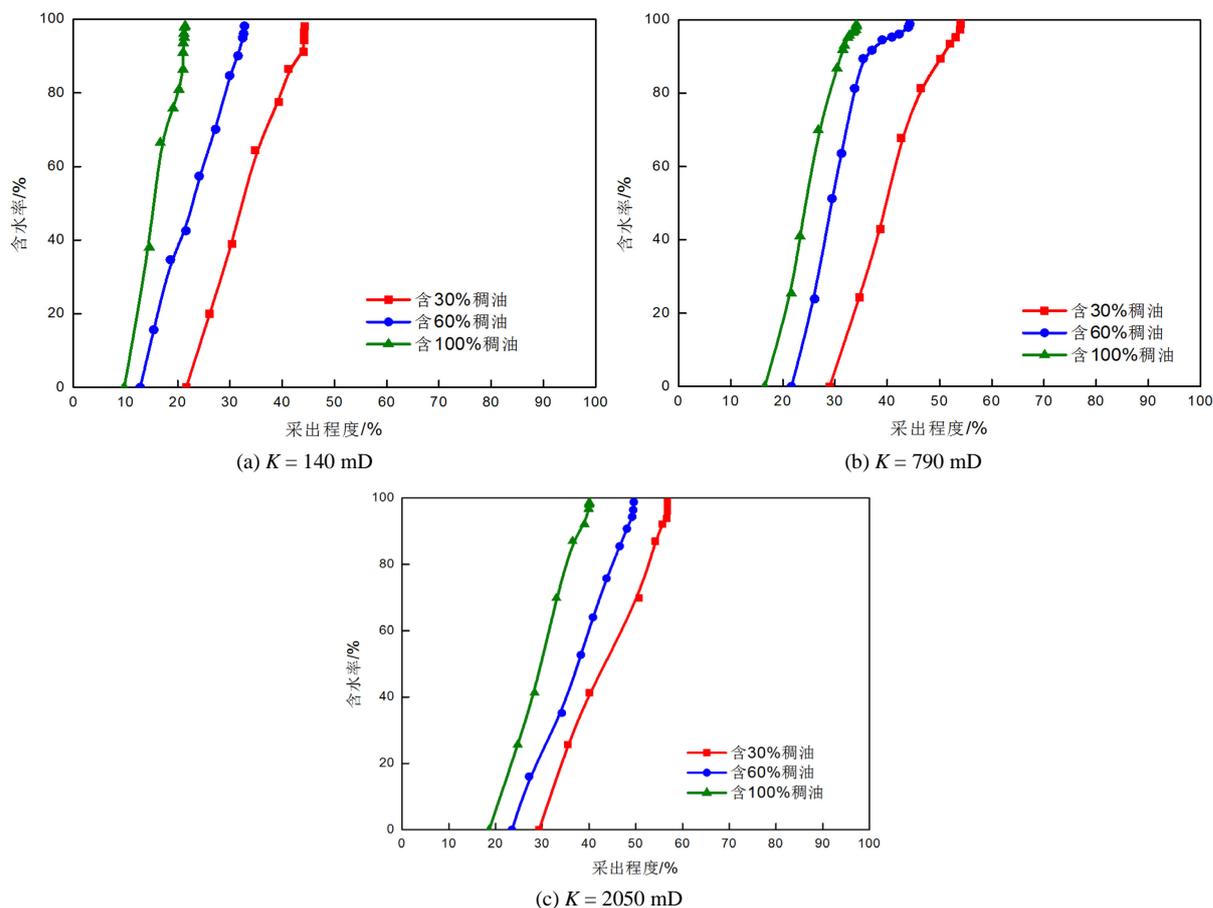


Figure 5. Water drive characteristic curves for oil samples in cores

图 5. 不同油样在岩心中的水驱特征曲线

牛顿流体特性受渗透率影响较大，渗透率越低，拟塑性越强；当渗透率相同时，随着油样中所含稠油比例增大，非牛顿渗流特性增强，且渗透率越小，非牛顿特性表现越明显。

2) 当岩样渗透率相近时，随着油样中稠油比例增大，水相相对渗透率迅速增大，而油相相对渗透率急剧降低，导致开采效果变差；且随着油样黏度增大，即油样非牛顿特性变强，对流体在较低渗透率岩样中的相对渗透率影响大于高渗透率的岩样。

3) 随着采出程度增大，产出液中的含水率迅速增大，且随着被驱替油样中稠油比例增加，产出液中含水率上升的速度加快；且渗透率越低，在驱替含不同稠油比例的油样时，含水率随采出程度增加的速度越快。

项目基金

国家自然科学基金重点项目(50934003)；国家重点基础研究发展计划(2013CB228002)。

参考文献 (References)

- [1] 宋向华, 蒲春生, 肖曾利等 (2004) 稠油热/化学采油技术概述. *特种油气藏*, **11**, 1-4.
- [2] Hasan, S.W., Ghannam, M.T. and Esmail, N. (2010) Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel*, **89**, 1095-1100.
- [3] 裴海华, 张贵才, 葛际江等 (2012) 稠油碱驱中液滴流提高采收率机理. *石油学报*, **33**, 663-669.

- [4] 牛刚, 周体尧, 李秀生等 (2010) 常规稠油水驱低速非达西渗流实验研究. *钻采工艺*, **33**, 57-60.
- [5] 张跃雷, 程林松, 刘倩 (2009) 稠油流变特性的基础实验研究. *特种油气藏*, **16**, 64-66.
- [6] 黄婷, 宁正福, 刘慧卿等 (2013) 组分影响稠油渗流特征实验研究. *科学技术与工程*, **13**, 6851-6854.
- [7] 吴淑红, 张锐 (1999) 稠油非牛顿渗流的数值模拟研究. *特种油气藏*, **6**, 25-28.
- [8] 汪双清, 沈斌, 林壬子 (2010) 稠油黏度与化学组成的关系. *石油学报(石油加工)*, **26**, 795-799.
- [9] 胡雪滨 (2005) 结构性原油及其渗流流变特性. *海洋石油*, **25**, 44-49.
- [10] 俞启泰 (1999) 几种重要水驱特征曲线的油水渗流特征. *石油学报*, **20**, 56-60.