

# The Stress State Equation and Sensitive Analysis of Remaining Oil at the Ultra-High Water-Cut Stage

Fen Li<sup>1</sup>, Haohan Liu<sup>2</sup>, Xiaoxu Dong<sup>3</sup>, Lin Chen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

<sup>2</sup>Department of Information Engineering of Sichuan College of Architectural Technology, Deyang Sichuan

<sup>3</sup>School of Science of Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Email: tsinghua616@163.com

Received: Apr. 7<sup>th</sup>, 2016; accepted: May 5<sup>th</sup>, 2016; published: Feb. 15<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

At the ultra-high water-cut development stage, remaining oil was no longer stored in formation capillary continuously. Therefore, the seepage state equation based on the continuous state could not guide the development practice of the oilfields at the ultra-high water-cut stage. By taking discrete distribution of remaining oil as the basis of study, combined with the macroscopic force calculation method of fluid mechanics and balance principle of force condition, the equations for equal diameter (unequal diameter) capillary oil droplet and oil film at the ultra-high water-cut stage were established. The principle of sensitivity analysis was introduced to set the vectors of sensitivity, by taking the basic data in a block from Shengli Oilfield for example, the sensitivity in the equations of different states was analyzed, by which a diagram was created for sensitivity analysis of remaining oil force condition at the ultra-high water-cut stage. The practice shows that the flooded water is the most sensitive to the viscous shear stress of remaining oil, and the interfacial tension is the second. Based on the principle of stress condition and sensitivity analysis, an oil development plan is reasonably made and the size of micro force is changed for the effective and rational development of discrete remaining oil stored in formation.

## Keywords

Ultra-High Water-Cut Stage, Capillary, Remaining Oil, Stress State, Sensitivity Analysis

---

# 特高含水期剩余油受力状态方程及敏感分析

李 奋<sup>1</sup>, 刘浩瀚<sup>2</sup>, 董晓旭<sup>3</sup>, 陈 琳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营

<sup>2</sup>四川建筑职业技术学院信息工程系, 四川 德阳

<sup>3</sup>西南石油大学理学院, 四川 成都

作者简介: 李奋(1974-), 女, 高级工程师, 长期从事油气田开发与开采技术工作。

Email: tsinghua616@163.com

收稿日期: 2016年4月7日; 录用日期: 2016年5月5日; 发布日期: 2017年2月15日

## 摘 要

特高含水开发阶段剩余油不再以连续态赋存于地层毛细管中, 基于连续态的渗流状态方程无法指导特高含水期油田开发实践。以剩余油离散态分布特征为基础, 结合流体力学微观力计算方法和受力平衡原理, 建立特高含水期等径(不等径)毛细管油滴、油膜受力状态方程; 引入敏感分析基本原理, 设定敏感向量, 以胜利油田某区块基础数据为例, 对不同状态方程进行敏感分析, 形成了特高含水期剩余油受力敏感分析图形。实践表明: 注入水对剩余油的黏滞剪切力敏感性最强, 其次是界面张力。结合受力状态及敏感分析原理, 合理制定开采计划, 改变微观作用力大小, 可将离散态赋存于地层的剩余油有效、合理地开采出来。

## 关键词

特高含水, 毛细管, 剩余油, 受力状态, 敏感分析

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University 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

## 1. 引言

进入特高含水开发阶段, 剩余油不再以连续态赋存于地层毛细管中, 而是多以离散态赋存于地层毛细管中, 越到含水开发后期, 微观因素影响越显著。Vizika 等[1]-[6]研究发现两相渗流状态不仅受孔隙空间特殊性质的影响, 而且受到毛细管力、黏度比、黏滞力、重力、浮力等微观因素的影响。胡盟明等[7]对油水乳状液中分散相液滴的力学行为进行了初探——剪切流对油水乳状液分散相液滴集聚的影响。文献[8]考察了特高含水期剩余油受力状态影响因素, 研究发现孔隙中剩余油滴主要受到浮力、重力、毛细管力、注入压力、摩擦阻力、黏滞力、贾敏效应阻力及附加阻力的作用。刘浩瀚[9]以特高含水期剩余油滴为研究对象, 对孔隙网络模型中的油滴进行微观受力状态分析, 建立微观孔道半径与剩余油滴受力关系方程。林景晔[10]结合微观水驱油实验和剩余油形成机理研究成果, 首次提出了砂岩油藏小孔剩余油物理模型, 还提出了小孔隙中油滴主要受 4 种力作用, 即毛细管力、浮力、黏滞力及注入水的压力。在文献[10]的基础上, 刘志雄[11]采用了经典力学中“受力分析”和流体力学中“压强分析”的方法对小孔剩

余油赋存状态进行了研究,通过对小孔剩余油深入的受力分析重新提出了小孔中油滴两端毛细管力之差、黏滯力、浮力、重力等4个数学表达式,最后完成盲孔和间小孔中油滴受力的关系式。李金丹[12]以特高含水期剩余油滴为研究对象,研究油藏倾角及韵律性对油滴受力状态影响,建立了油藏倾角和韵律性作用下的油滴受力状态方程。

胜利油田整装油田综合含水已超过95%,已整体进入特高含水开发阶段。在特高含水期,剩余油分布变得更加复杂,更加分散,微观因素影响越显著。当前形势下,如何将高含水和特高含水期油藏中的剩余油更有效地、更合理地开采出来是未来油田开发之重。这不但需要准确认识目前开发状况下剩余油赋存状态是什么样的,更为重要的是要研究这些剩余油在什么情况下能够有效动用。当前形势下,如何将特高含水期油藏中剩余油更有效地、更合理地开采出来是未来油田开发之重,通过研究特高含水期水驱剩余油移动动力条件,能有效指导特高含水期油田实际注水开发。

## 2. 特高含水期典型赋存状态剩余油受力状态方程研究

### 2.1. 等径毛细管剩余油受力状态方程

#### 1) 泡状油滴的受力分析

泡状油滴在垂直于毛细管壁上受力平衡,所以只考虑水对于泡状油滴的剪切力作用,在等径毛细管中剪切力表达式如下:

$$f_n = \mu_o A_j \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (1)$$

式中:  $f_n$  为剪切力, N;  $\mu_o$  为油黏度, mPa·s;  $A_j$  为渗流面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\frac{\Delta v}{\Delta y}$  为速度梯度,  $\text{s}^{-1}$ 。

因而在开发一定时间后,在等径单孔道毛细管中,且油滴半径小于孔道半径时,一般不存在泡状剩余油滴。

#### 2) 接触状油滴(毛细管壁为亲水型)的受力分析

在竖直毛细管壁方向上,受到重力在垂直水驱方向上的分力、浮力在垂直水驱方向上的分力、管壁对油滴的支持力,如图1所示,这些力在竖直水驱方向上的合力为零,即:

$$N = (\rho_w - \rho_o) V_o g \cos \alpha - \sigma \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) A_j \quad (2)$$

式中:  $N$  为支持力, N;  $(\rho_w - \rho_o)$  为水油密度差,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $V_o$  为剩余油等效体积,  $\mu\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\alpha$  为地层倾角,  $^\circ$ ;  $\sigma$  为界面张力, N/m;  $r_1$  为喉道半径,  $\mu\text{m}$ ;  $r_2$  为孔隙半径,  $\mu\text{m}$ 。

在沿管壁水驱方向上,受到管壁对油滴的摩擦力、重力在水驱反方向的分力、黏性剪切力,合力为:

$$F_H = \frac{\mu_o A_j v_w}{r} + (\rho_o - \rho_w) V_o g \sin \alpha - \mu_s N \quad (3)$$

式中:  $F_H$  为合力, N;  $v_w$  为水渗流速度, m/s;  $\mu_s$  为摩擦系数, 1;  $r$  为剪切厚度,  $\mu\text{m}$ 。

由连续相液流的动压力所提供的流场能量较小,此时主要以黏性剪切力为主控制着液滴的变形,而不能使其破裂,随着液滴长短径比的增大,对一定粒径的液滴,其所受的黏性剪切力也愈大,对由黏性剪切力所控制的液滴变形而言,当液滴的长短径比达到一定的比值时黏性剪切力对油滴的动力克服了阻力,则毛细管中油滴就开始启动。

#### 3) 油膜受力状态方程

油膜多为亲油型，等径毛细管中油膜主要受重力、浮力、油滴表面的界面张力、毛细管壁对于油滴的摩擦力、黏滞力、管壁对油膜的支持力共同作用，受力分析图如图 2 所示。

在竖直方向上，受到重力在垂直水驱方向上的分力、浮力在垂直水驱方向上的分力、吸附力与脱附力在垂直水驱方向上分力、管壁对油膜的支持力，这些力在竖直水驱方向上的合力为零：

$$N = (\rho_w - \rho_o)V_o g \cos \alpha + 2\pi r \sigma \sin \beta - \pi r^2 \frac{\sigma}{R} \quad (4)$$

式中： $R$  为效油滴半径， $\mu\text{m}$ ； $\beta$  为等效方向角， $(^\circ)$ 。

在沿管壁水驱方向上，受到管壁对油膜的摩擦力、重力在水驱反方向的分力、浮力在水驱方向上的分力、黏性剪切力、脱附力在水驱方向上分力：

$$F_H = (\rho_o - \rho_w)V_o g \sin \alpha + \frac{\mu_o A_j v_w}{r} - 2\pi r \sigma \cos \beta - \mu_s N \quad (5)$$

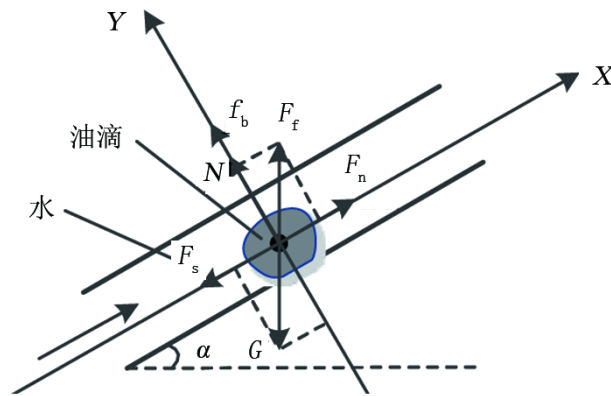


Figure 1. Stress curve of oil droplet in the capillary  
图 1. 等径毛细管接触状油滴受力分析图

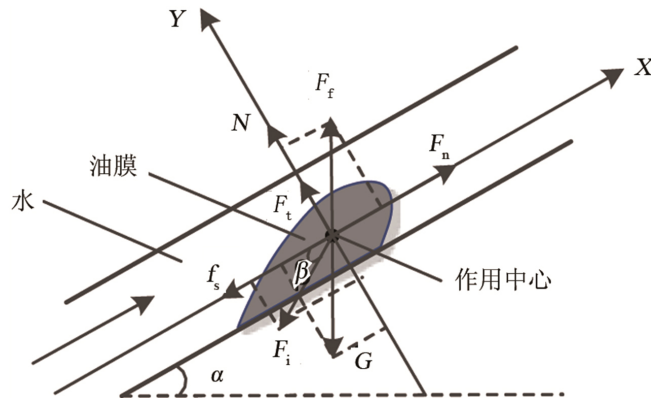


Figure 2. Stress curve of oil film in the capillary  
图 2. 等径毛细管油膜受力分析图

## 2.2. 不等径单孔毛细管中剩余油受力分析

### 1) 不等径单孔毛细管中油滴受力分析

对于亲水不等径毛细管中的油滴，主要是接触状油滴，接触面间是束缚水，油滴两端处于非连通状态，因而需考虑驱替压力的作用。驱替方向主要受驱替力、界面收缩力、水对油的黏滞力、贾敏效应阻力的共同作用，受力分析图如图 3 所示：

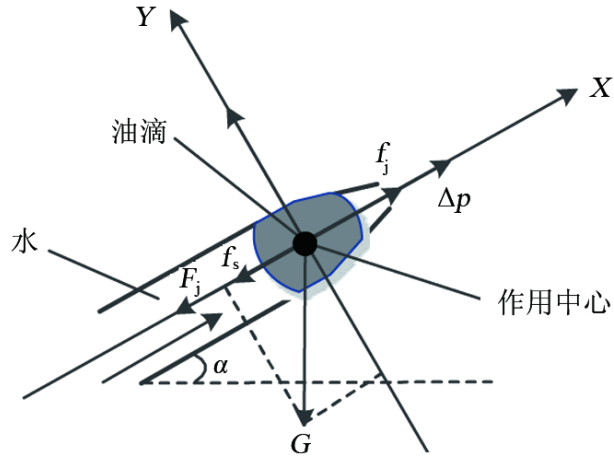


Figure 3. Stress curve of oil droplet in the capillary with different capillary radius

图 3. 不等径毛细管油滴受力分析图

$$F_H = \left[ \Delta p - 2\sigma \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) + \frac{2\sigma}{r} \right] \pi r^2 + \frac{\mu_o A_j v_w}{r} \quad (6)$$

$A_j$  为油滴在垂直于毛细管壁方向上的投影面积，结合油滴变形进行确定。

假定剩余油在孔道内流动为单向流，对于径向流情形可考虑如下方程：

$$v_w = \frac{K_w}{\mu_w} \frac{\Delta p}{\ln \left( \frac{r_c}{r_w} \right)} \frac{1}{R} \quad (7)$$

当该孔道处于层流状态， $v_w$  服从达西渗流定理：

$$v_w = \frac{K_w}{\mu_w} \frac{\Delta p}{L} \quad (8)$$

当该孔道处于湍流状态， $v_w$  满足如下方程：

$$\frac{dp}{dL} = - \left( \frac{\mu_w}{K_w} v + a \rho v^2 \right) \quad (9)$$

当该孔道处于湍流状态，惯性力占主导作用：

$$v_w = C \left( \frac{dp}{dL} \right)^n \quad (10)$$

式中： $C$  为渗流系数，与流体与多孔介质的性质有关； $n$  为渗流指数，取值为 0.5~1 之间； $K_w$  为水相相对渗透率，mD； $\mu_w$  为水相黏度，mPa·s； $L$  为孔道长度， $\mu\text{m}$ ； $a$  为常数， $\text{m}^{-1}$ 。式(10)表明对于湍流状态的孔道，受力状态分析速度梯度发生变化，不能用达西渗流速度去确定黏性剪切力大小。

对于不等径单孔毛细管中的油滴，其驱替方向上合力  $F_H$  大于或者等于零时，油滴处于启动状态，即能克服贾敏效应阻力的作用：

$$\left[ \Delta p + \frac{2\sigma}{r} \right] \pi r^2 + \frac{\mu_o A_j v_w}{r} \geq 2\sigma \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \pi r^2 \quad (11)$$

当水对油的黏滞力的方向发生变化时，此时油滴会处于涡旋状态，此时离心惯性力为：

$$F = \Delta M r \omega^2 \quad (12)$$

式中： $\Delta M$  为油滴质量，kg； $\omega$  为角速度，rad/s； $F$  为离心惯性力，N。

### 2) 不等径毛细管油膜受力分析

对于不等径单孔毛细管来说，沿驱替方向主要受水对油的黏滞力，油对毛细管壁的摩擦力。

油与毛细管壁间的摩擦力为：

$$f = \mu_s N \quad (13)$$

在垂直于毛细管壁方向，油膜主要受重力、浮力、吸附力、脱附力作用，受力分析图如图 4 所示：

$$N = (\rho_w - \rho_o) V_o g \cos \alpha + 2\pi r \sigma \sin \theta - \pi r^2 \frac{\sigma}{R} \quad (14)$$

沿驱替方向，油膜所受合力如下：

$$F_H = \mu_o A_j \frac{\Delta v_w}{r} - \mu_s N \quad (15)$$

目前，较为通用的水力摩擦系数（管流层流时）由下式表示：

$$\lambda = \frac{k}{Re} \quad (16)$$

式中： $Re$  为雷诺数，1； $k$  为卡基霍夫数，取  $k = \frac{4}{35}$ ，还有的学者取为  $k = 64$ ； $\Delta v_w$  为最大剪切速度，m/s。

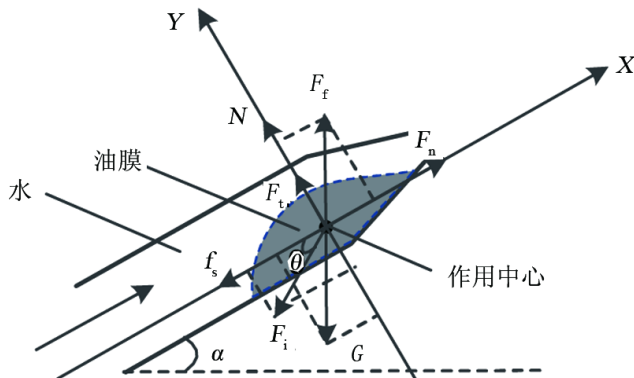


Figure 4. Stress curve of oil film in the capillary with different capillary radius

图 4. 不等径毛细管油膜受力分析图

## 3. 特高含水期典型赋存状态剩余油受力敏感分析及应用

### 3.1. 受力敏感分析基本原理

- 1) 结合流体力学基本原理，建立不同孔道剩余油受力状态方程；
- 2) 选择状态方程，并对方程中相关参数赋初值；
- 3) 确定敏感向量并作用到状态方程：统一方程中物理量的单位，并设定敏感向量：

$$\alpha = (-0.2, -0.15, -0.1, -0.05, 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2)$$

- 4) 结合相关软件 SPSS、excel 或 Matlab，确定参数值；
- 5) 形成敏感分析图形，并进行分析。

### 3.2. 实例应用

确定受力状态方程后, 选择胜利油田某区块岩样初始参数: 倾角  $\alpha = 0$ , 黏度  $\mu_o = 25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 渗透率  $K = 1325 \text{ mD}$ , 岩样长度  $L = 5 \text{ cm}$ , 孔径长  $d = 15 \mu\text{m}$ , 油滴直径  $d_o = 10 \mu\text{m}$ , 界面张力  $\sigma = 10 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ , 水的黏度  $\mu_w = 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 压差  $\Delta p = 0.06 \text{ MPa}$ 。

结合敏感分析基本原理, 进行等径、不等径毛细管中油滴、油膜敏感性分析, 结果见图5~图8。

图5中折线1代表水对等径毛细管接触状油的黏滞剪切力, 折线2代表等径毛细管接触状油滴与毛细管壁之间的摩擦力。由图5很容易看出黏滞剪切力与摩擦力两者改变自身相同的比例时, 黏滞剪切力对于整体的影响幅度较大, 所以等径毛细管接触状油的黏滞剪切力较敏感。

图6中折线1代表水对等径毛细管油膜的黏滞剪切力, 折线2代表等径毛细管油膜的界面张力, 折线3代表等径毛细管中油膜与毛细管壁之间的摩擦力。由图6很容易看出三者改变自身相同的比例时,

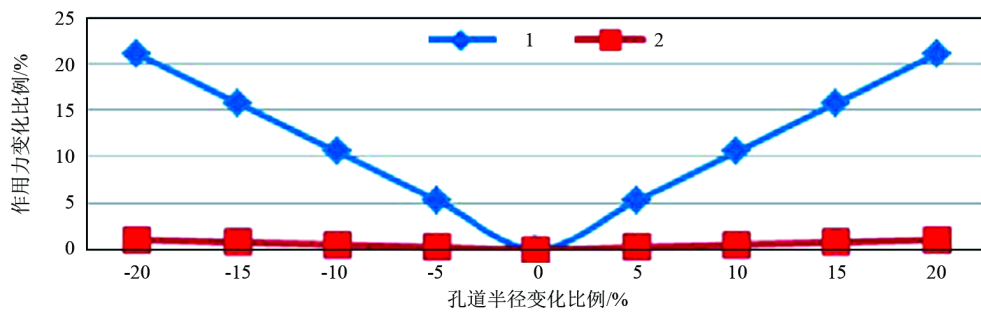


Figure 5. Stress sensitivity analysis of oil droplet in the capillary

图5. 等径毛细管接触状油滴受力敏感分析

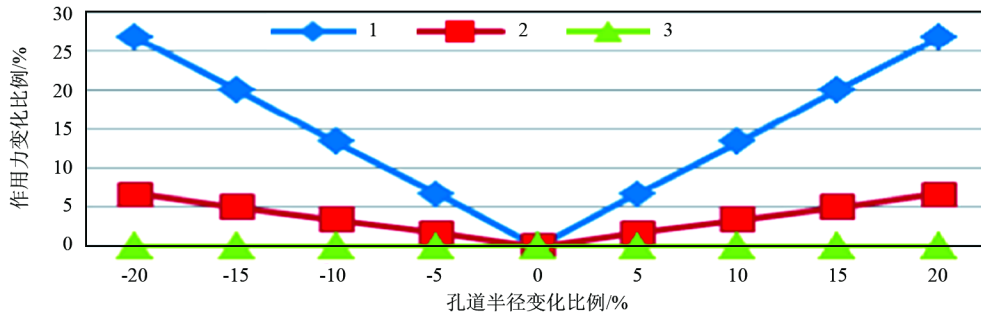


Figure 6. Stress sensitivity analysis of oil film in the capillary

图6. 等径毛细管油膜受力敏感分析

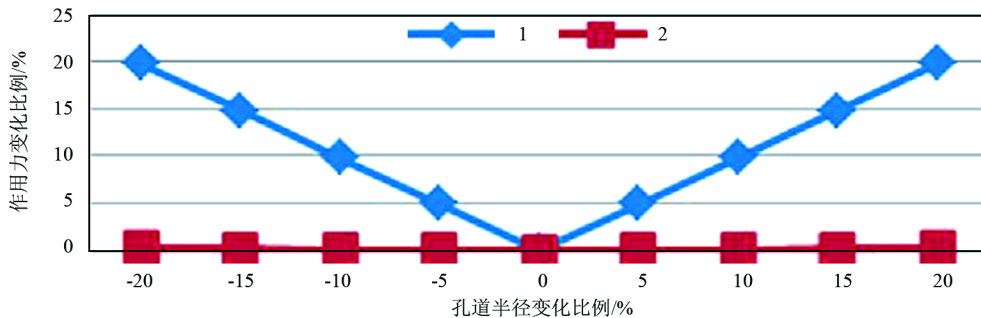


Figure 7. Stress sensitivity analysis of oil droplet in the capillary with different radius

图7. 不等径毛细管油滴受力敏感分析



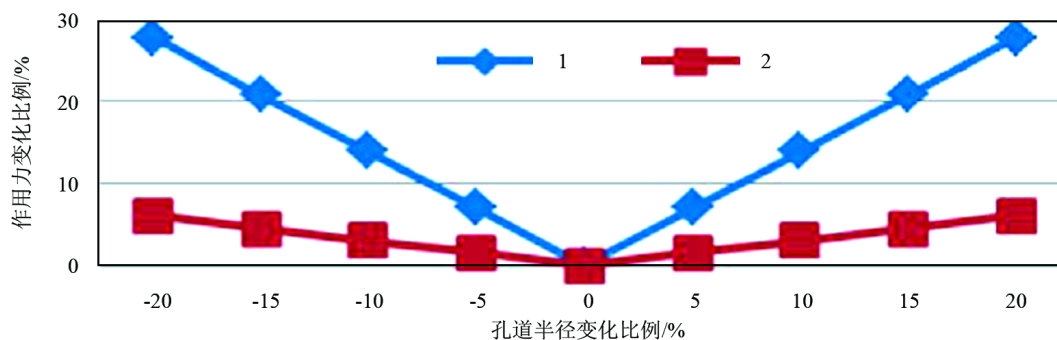


Figure 8. Stress sensitivity analysis of oil film in the capillary with different radius

图 8. 不等径毛细管油膜受力敏感分析

黏滞剪切力对于整体的影响幅度较大，所以等径毛细管油膜所受力中黏滞剪切力较敏感。

图 7 中折线 1 代表水对不等径毛细管油滴的黏滞剪切力，折线 2 代表油滴界面张力、水的驱替力及楔压效应阻力整体对不等径毛细管油滴的作用力。由图 7 很容易看出两者改变自身相同的比例时，黏滞剪切力对于整体的影响幅度较大，所以黏滞剪切力较敏感。

图 8 中折线 1 代表水对不等径毛细管油膜的黏滞剪切力，折线 2 代表不等径毛细管油膜与毛细管壁之间的摩擦力。由图 8 很容易看出黏滞剪切力与摩擦力两者改变自身相同的比例时，黏滞剪切力对于整体的影响幅度较大，所以不等径毛细管油膜所受力中黏滞剪切力较敏感。

综合以上情况可以得出，油膜或油滴在各种类型毛细管存在状态下所受力中水对油的黏滞剪切力最敏感，作用效果最明显，为最主要的作用力。合理改变微观作用力大小，对提高采收率有十分重大的意义。

#### 4. 结论

- 1) 建立了特高含水期等径及不等径毛细管油滴及油膜受力状态方程。
- 2) 等径或不等径毛细管油滴或者油膜，所受水对油的黏滞剪切力最敏感，作用效果最明显。
- 3) 界面张力对等径毛细管中油膜影响较大，重力浮力影响较小。

#### 基金项目

国家科技重大专项(2016ZX05011); 中国石化股份胜利油田分公司项目(YKY1501); 四川省教育厅项目(15ZB0447)。

#### 参考文献 (References)

- [1] Vizika, O., Avraam, D.G. and Payatakes, A.C. (1994) On the Role of the Viscosity Ratio during Low-Capillary Number Forced Imbibitions in Porous Media. *Journal of Colloid and Interface Science*, **278**, 386. <https://doi.org/10.1006/jcis.1994.1243>
- [2] Hughes, R.G. and Blunt, M.J. (2000) Pore Scale Modeling of Rate Effects in Imbibition. *Transport in Porous Media*, **40**, 295. <https://doi.org/10.1023/A:1006629019153>
- [3] Singh, M., Mani, V., Honarpour, M.M., et al. (2001) Comparison of Viscous and Gravity Dominated Gas-Oil Relative Permeabilities. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **30**, 67-81. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(01\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(01)00101-2)
- [4] Tsakiroglou, C.D., Theodoropoulou, M. and Karoutsos, V. (2003) Non-Equilibrium Capillary Pressure and Relative Permeability Curves of Porous Media. *AICHE Journal*, **49**, 2472-2486. <https://doi.org/10.1002/aic.690491004>
- [5] Tsakiroglou, C.D., Theodoropoulou, M., Karoutsos, V., et al. (2005) Determination of the Effective Transport Coefficients of Pore Networks from Transient Immiscible and Miscible Displacement Experiments. *Water Resources Re-*



search, 42, 1029-1031. <https://doi.org/10.1029/2003wr002987>

- [6] Theodoropoulou, M.A., Sygouni, V., Karoutsos, V., *et al.* (2008) Relative Permeability and Capillary Pressure Functions of Porous Media as Related to the Displacement Growth Pattern. *International Journal of Multiphase Flow*, 31, 1155-1190. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.06.009>
- [7] 胡盟明, 董宁平. 油水乳化液中分散相液滴的力学行为初探——剪切流对油水乳状液分散相液滴集聚的影响[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(4): 46-50.
- [8] 刘浩瀚. 特高含水期剩余油滴可动条件及驱油效率变化机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- [9] 刘浩瀚, 刘志斌, 丁显锋. 特高含水期剩余油孔道选择微观机理研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(5): 92-97.
- [10] 林景哗, 夏丹. 注水开发油田剩余油分布及提高采收率的水动力学方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(1): 79-80.
- [11] 刘雄志, 杨兆平, 惠学智, 等. 小孔剩余油受力分析及数学模型的改进[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(2): 77-82.
- [12] 李金丹, 刘浩瀚, 刘志斌, 等. 特高含水期油藏倾角及韵律性对油滴受力状态影响研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2014, 36(2): 124-127.

[编辑] 黄鹂

---

**Hans** 汉斯

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)