文章编号:1673-5005(2011)05-0139-04

# 黏弹性流体驱替微孔道中残余油滴的水动力学机制

杨树人1,王德民1,2,夏惠芬1,刘丽丽1

(1.东北石油大学 提高油气采收率教育部重点实验室,黑龙江 大庆 163318;2.中石油大庆油田责任公司,黑龙江 大庆 163453)

摘要:选取上随体 Maxwell 本构方程建立黏弹性流体在微孔道中的流动方程,运用控制体积法和交替方向隐式 (ADI)方法得到流场的数值解,计算流动的速度场和应力场,分析不同弹性驱替液作用在残余油滴上的驱替力,以及 不同弹性驱替液驱替时残余油滴的变形,从水动力学角度探索聚合物溶液所具有的弹性驱替残余油滴的水动力学 机制。结果表明:与无弹性的驱替液相比,黏弹性驱替液作用在残余油滴上的法向应力和水平驱替力都更大,而且 流场的应力分布也产生突变;在压力梯度相同的情况下驱油时,水、幂律流体、黏弹性聚合物溶液(威森伯格数 We = 0.3)对残余油滴的推力之比约为1:8:20;黏弹性驱替液会使油滴产生更大的变形,驱油效果会更好。

关键词:黏弹性流体; 聚驱; 微孔道; 残余油;威森伯格数

中图分类号:TE 357.6 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.026

## Hydrodynamics mechanism of viscoelastic fluids displacing residual oil droplets in micro pores

YANG Shu-ren1, WANG De-min1,2, XIA Hui-fen1, LIU Li-li1

(1. EOR Key Laboratory of Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;
 2. Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163453, China)

Abstract: In order to analyze the microscopic stress field acting on residual oil droplets in micro pores, calculate its deformation, and explore the hydrodynamic mechanism of viscoelastic fluids displacing oil droplets, the viscoelastic fluid flow equations in micro pores were established by choosing the upper-convected Maxwell constitutive equation. The numerical solutions of the flow field were obtained by volume control and alternate direction implicit methods. The velocity field and microscopic stress field, the forces acting on residual oil droplets, the deformations of residual oil droplets by various viscoelastic displacing fluids were calculated and analyzed. The results demonstrate that both the normal stress and horizontal force acting on the residual oil droplets by viscoelastic fluids are much larger than those of inelastic fluid. The distribution of normal stress changes abruptly. Under the condition of the same pressure gradient, the ratio of the horizontal forces acting on the residual oil droplets by different displacing fluids which are water, the power-law fluid and viscoelastic fluid with Wesson Borg number of 0.3 is about 1:8 :20. The viscoelastic fluids cause the residual oil droplet to deform significantly, and the flooding is better.

Key words: viscoelastic fluids; polymer flooding; micro pores; residual oil; Wiesenberger number

大庆油田的实践表明,水驱之后采用具有黏弹 性的聚合物溶液尤其是高浓聚合物溶液驱油可进一 步提高原油采收率。为探索聚合物所具有的弹性对 残余油的驱替机制,王德民<sup>[1]</sup>、刘春泽<sup>[2]</sup>、夏惠 芬<sup>[3,45]</sup>、姜海峰<sup>[6]</sup>、尹洪军<sup>[7]</sup>、Chun Huh<sup>[8]</sup>、张丽 娟<sup>[9-10]</sup>等分别从不同的角度分析聚合物溶液所具有 的弹性对微观驱油的影响。笔者选取上随体 Maxwell 本构方程建立黏弹性流体在微孔道中的流动方程,运用数值分析方法对流场进行数值计算,得到流动的速度场和应力场,进而分析对比不同流体对微孔道中的油滴的驱替力,并通过分析残余油滴的受力及变形的影响因素,进一步揭示黏弹性驱替液对微孔道中残余油滴驱替的水动力学机制。

收稿日期:2011-05-11

#### 1 流动方程

图 1 为具有黏弹性的聚合物溶液在如二维微孔 道中驱替油滴时的显微照片。由于聚合物溶液具有 黏弹特性,常规的简单本构方程已经不能用于描述 其复杂的流变特性。实践表明,上随体 Maxwell 本 构方程<sup>[11]</sup>比较适合描述聚合物溶液黏弹特性。





#### Fig. 1 Micrograph of residual oil droplet

连续性方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = \boldsymbol{0}. \tag{1}$$

式中,u为速度矢量。

运动方程为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{F} + \frac{1}{\rho} \mathrm{div} \boldsymbol{P}.$$
 (2)

$$\boldsymbol{P} = -p\boldsymbol{I} + \boldsymbol{T}, \qquad (3)$$

式中, F 为质量力; $\rho$  为流体的密度;P 为应力张量; I 为单位张量;-p 为静压力;T 为偏应力张量; $\nabla$  表 示上随体导数。

本构方程为

$$\mathbf{T} + \lambda \mathbf{T} = \eta \mathbf{A}_{1}. \tag{4}$$

式中, $\lambda$  为松弛时间,用以表征流体的弹性; $\eta$  为剪 切黏度; $A_1$  为一阶 Rivlin-Ericksen 张量。

## 2 流动方程的数值求解方法

由图 1 所示的微观流场简化所得到的微孔道中 驱替液流动的物理模型如图 2 所示。由式(1)~



Fig. 2 Physical model

(4)组成的流动方程是一个非线性微分方程组,流 场中驱替液和残余油滴两种流体的共存,边界条件 非常复杂,采用解析方法来求解流动方程是不可能 的,因此必须采用数值计算方法进行求解。

将流场按照一定的规则离散成若干个计算单元, 见图 3。采用由帕坦卡提出的控制体积法<sup>[12]</sup>对流动 方程进行离散化处理,采用交替方向隐式(ADI)方 法<sup>[13-14]</sup>求解离散方程得到流场的速度分布。



Fig. 3 Computational grid and boundary

## 3 残余油滴的受力及变形计算分析

在求解出流场的速度分布之后,利用本构方程 即可计算流场的应力分布。流场中任意一个曲面上 某一点处的应力 *p*。均可由下式确定:

*p*<sub>n</sub>=*n* · *P*. (5) 式中, *p*<sub>n</sub> 表示以 *n* 为外法线方向的受力面上的应力 矢量(见图 4)。油滴迎流面和背流面上两点处的应 力如图 5 所示。图 5 中, *p*<sub>n</sub>, 为切向应力; *p*<sub>n</sub>, 为法向 应力; *p*<sub>w</sub>, 为铅直方向应力; *p*<sub>n</sub>, 为水平方向应力。



图 4 *p*<sub>n</sub> 与 *n* 的关系

Fig. 4 Relation between  $p_n$  and n



为了分析各种不同流变特性流体流过油滴时对 油滴的作用力,分别计算了孔隙为6μm的微孔道中, 压力梯度(Δp)为0.02 MPa/m情况下,黏度为1mPa ・s的牛顿流体(水)、黏度取30mPa・s流性指数取 0.6 的幂律流体及黏度取 30 mPa · s 黏弹性流体流过 油滴时的应力场,并根据式(5)和图 4 所示的两种分 解方式分别计算了油滴表面上的切向偏应力 $\tau_{nr}$ 、法 向偏应力 $\tau_{nn}$ 、水平方向偏应力 $\tau_{nh}$ 和水平方向应力 $p_{nh}$ 差值,结果见图 6(其中压力为正,拉力为负)。图 6 中,水是纯黏流体,弹性几乎为0,幂律流体仅具有较 低的弹性,而聚合物溶液具有较大的弹性。计算过程 中采用威森伯格数  $We^{[7]}$ 来表征流动过程中流体弹性 所起的作用,威森伯格数的表达式为

$$We = \frac{\lambda u}{D}.$$
 (6)

式中,*u*为特征速度;*D*为微孔道的特征尺度,这里 取其宽度。



Fig. 6 Normal deviatoric stress  $au_{nn}$  on oil

droplet surface when We is 0.3

从图 6 中可以看出:驱替液为水和幂律流体时 的法向偏应力很小,且法向偏应力是反对称的,即油 滴的前半部分均是受压的,后半部分均是受拉的;驱 替液为聚合物溶液时的法向偏应力与无弹时相比不 仅数值较大,而且法向偏应力的分布也产生了突变, 即油滴表面前半部分的法向应力明显的大于后半部 分的法向应力。因此,聚合物水溶液的黏弹性会使 残余油滴的受力尤其是法向应力显著地增大。

为了更加形象地描绘出不同流体作用在油滴上的力,这里给出了黏弹性流体作用在油滴上合成后的应力矢量图(图7)。

微观可视化驱油结果<sup>[1]</sup>和理论研究结果<sup>[4]</sup>均表 明,具有黏弹性的聚合物溶液会对残余油滴产生更大 的水平推力,即油滴表面法向应力的不对称所产生的 应力差是油滴变形的主要原因。因此,有必要进一步 分析不同驱替液驱油时的水平推力,即水平方向应力 差,压力梯度分别为0.02和0.005 MPa/m时,水平方 向应力*p*<sub>nh</sub>的差值如图8所示。结果表明:水、幂律流 体、黏弹性流体(威森伯格数 We=0.3)三者的水平应 力差之比约为1:8:20,也就是说在压力梯度相同的情 况下,聚合物驱油时(威森伯格数 We=0.3)对油滴的 驱动力大约是水驱时的20倍。



图 7 We=0.3时作用在油膜上的应力  $p_n$  矢量

Fig. 7 Stress  $p_n$  vector on oil droplet film

when We is 0.3



在分析计算作用在残余油滴的受力后,采用 Laplace 方程可计算出残余油滴的变形<sup>[15-16]</sup>。在与 前面计算条件相同的情况下,亲油、亲水岩石表面上 残余油滴变形的计算结果如图9所示。从图中可以



看出,随着驱替液弹性的增强,残余油滴的变形也越 大。在油田生产过程中随着距离注入井远近的不 同,各点的压力梯度也不同,因此计算了不同压力梯 度下亲油岩石表面上残余油滴变形量(图9)。从中 可以看出,在距离注入井稍远的区域内,与水驱油时 相对比,在具有弹性驱替液的驱替下残余油滴仍能 够产生更明显的变形。计算结果表明,无论是亲油 岩心还是亲水岩心中,弹性驱替液的驱动残余油滴 时产生变形更明显,驱油效果会更好。

#### 4 结 论

(1)与无弹性驱替液相比,具有弹性的驱替液 作用在残余油滴上的法向偏应力不仅数值较大,而 且法向偏应力的分布也产生了突变。随着驱替液弹 性的增强,驱替液对油滴的水平驱替力增大。

(2) 压力梯度相同时的水、幂律流体、黏弹性流体对油滴的水平驱替力之比约为1:8:20,即聚合物驱油时残余油滴所受的水平驱动力大约是水驱的20倍。

(3)在弹性驱替液的驱替过程中,残余油滴的 变形更明显,驱油效果会更好。

#### 参考文献:

- WANG Demin, CHENG Jiecheng, YANG Qingyan, et al. Viscous-elastic polymer can Increase micro scale displacement in cores [R]. SPE 63227, 2000.
- [2] 刘春泽,程林松,夏惠芬,等. 黏弹性聚合物溶液对残 余油滴的作用机制[J].石油学报,2006,28(2):85-88.
  LIU Chun-ze, CHENG Lin-song, XIA Hui-fen, et al. Effect of viscous-elastic polymer on residual oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 28(2):85-88.
- [3] XIA Huifen, YE Ju, KONG Fanshun. Effect of elastic behavior of HPAM solutions on displacement efficiency under mixed wettability conditions [R]. SPE 90234,2004.
- [4] 夏惠芬,王德民,王刚,等. 化学驱中黏弹性驱替液的 微观力对残余油的作用[J].中国石油大学学报:自然 科学版,2009,33(4):150-155.

XIA Hui-fen, WANG De-min, WANG Gang, et al. Effect of micro forces caused on residual oil by driving fluid with viscoelasticity in chemical flooding[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(4):150-155.

[5] 夏惠芬,王海峰,王刚,等.聚合物/甜菜碱表面活性 剂提高水驱后残余油采收率研究[J].中国石油大学 学报:自然科学版,2007,31(6):74-78.

XIA Hui-fen, WANG Hai-feng, WANG Gang, et al. Enhanced residual oil recovery by using polymer/betaine surfactant system after water flooding[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007,31(6):74-78.

[6] 姜海峰,王德民,夏惠芬. 梳形聚合物溶液的流变性及 其驱油效果分析[J].大庆石油学院学报,2008,32 (4):61-65.

JIANG Hai-feng, WANG De-min,XIA Hui-fen. Rheological properties of comb polymer solutuins and the annalysis of its flooding efect [J]. Journal of Daqing Peteoleum Institute, 2008,32(4):61-65.

- [7] YIN Hongjun, WANG Demin, ZHONG Hui-ying, et al. Study on flow behaviors of viscoelastic polymer solution in micro pore with dead end[R]. SPE 101950,2006.
- [8] CHUN Huh, GARY A Pope. Residual oil saturation from polymer floods: laboratory measurements and theoretical interpretation [R]. SPE113417,2008.
- [9] 张丽娟,岳湘安.两类典型非牛顿驱油剂的渗流特性 [J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2): 76-81.

ZHANG Li-juan, YUE Xiang-an. Percolation behavior of two typical non-Newtonian oil displacement agents [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2008,32(2):76-81.

- [10] 张丽娟,岳湘安,刘中春,等. 黏弹性流体在盲端孔隙中的流场[J].流体动力学:A,2002,17(6):748-755.
  ZHANG Li-juan, YUE Xiang-an, LIU Zhong-chun, et al. Flow field of viscoelastic fluid in pores with dead ends[J]. Journal of Hydrodynamics (A), 2002,17 (6):748-755.
- [11] 韩式方. 非牛顿流体本构方程和计算解析理论[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [12] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 译. 北京:科学出版社,1989.
- [13] YANG Shuren, WANG Chunsheng, CUI Haiqing, et al. Numerical calculation on steady flows of viscoelastic fluid in an ecentric annulus with inner rod moving axially[J]. Journal of Hydrodynamics(B),2005,17(4):514-518.
- [14] HE Fengyun, YANG Shuren. Numerical simulation on unsteady flows of viscoelastic fluid in an eccentric annulus with inner rod reciprocation [J]. Journal of Hydrodynamics(B),2008,20(2):261-266.
- [15] 王晓东,彭晓峰,闵敬春,等.接触角滞后现象的理论分析[J].工程热物理学报,2002,23(1):67-70.
  WANG Xiao-dong, PENG Xiao-feng, MIN Jing-chun, et al. Hysteresis of contact angle at liquid-solid interface
  [J]. Journal of Engineering Thermo physics, 2002, 23 (1):67-70.
- [16] 刘肖珩. 黏附于血管壁表面的白细胞在稳定剪切流 动下发生变形的生物力学模型[J]. 生物医学工程杂 志,2003,20(1):30-34.

LIU Xiao-hang. A biomechanical model for simulating the deformation of a leukocyte adhered to the surface of a blood vessel under steady shear flow [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2003,20(1):30-34.

(编辑 刘为清)