

文章编号:1673-5005(2009)04-0150-06

化学驱中黏弹性驱替液的微观力对残余油的作用

夏惠芬¹, 王德民², 王 刚², 王海峰¹

(1. 大庆石油学院 提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆油田 技术发展部, 黑龙江 大庆 163453)

摘要:在相同黏度情况下, 黏弹性聚合物溶液和无弹性甘油溶液的驱油效率不同, 用宏观力不能解释驱油效率产生差别的原因, 因此应分析弹性驱替液和无弹性驱替液作用在残余油上的微观力的变化以及对驱油效率的影响。通过理论分析和可视化驱油试验, 计算了弹性驱替液和无弹性驱替液在简化孔隙模型中的流线和速度, 分析了由速度和流线变化引起的微观力的变化及其对残余油的作用, 用可视化岩心模型给出了不同黏弹性流体的驱油效果。结果表明, 微观力不改变宏观压力梯度, 且微观力主要作用在不同类型残余油的突出部分, 引起了突出部分的形状变化和运移。

关键词:化学驱; 黏弹性驱替液; 微观力; 残余油

中图分类号: TE 357

文献标识码: A

Effect of micro forces caused by driving fluid with viscoelasticity on residual oil in chemical flooding

XIA Hui-fen¹, WANG De-min², WANG Gang², WANG Hai-feng¹

(1. MOE Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China;

2. Department of Science and Technology Development, Daqing Oilfield, Daqing 163453, China)

Abstract: At the same viscosity, the oil displacement efficiency of viscoelastic polymer solution is different from that of glycerin solution without elasticity, and the difference could not be explained by macro forces. Therefore, the changes of micro forces acting on residual oil by driving fluids with and without elasticity and the effect of driving fluids properties on oil displacement efficiency were analyzed. The streamlines and velocity of the fluids with and without elasticity flowing in simplified pore models were mathematically simulated through theoretical analysis and visual oil displacement experiment. The micro force variation with velocity and streamline and its effect on residual oil were analyzed, and the oil displacement efficiencies of different viscoelastic fluids were obtained by visual core model. The results show that the micro force does not change the macro pressure gradient, and mainly acts on the protrudent portion of different types of residual oils and causes its shape change and migration.

Key words: chemical flooding; viscoelastic driving fluid; micro force; residual oil

石油开采数据表明, 聚合物驱的采收率高于水驱的采收率^[1-7]。目前, 关于聚合物驱油提高采收率的研究或者未给出残余油饱和度降低的机制, 或者所给出的机制将使驱替压力梯度增加(聚合物溶液的黏度比水的黏度高^[4,5,8,9]), 这有可能使黏滞驱替压力梯度增加, 并且需要油层中残余油多为油膜, 这就要求油层必须是亲油的。笔者研究黏弹性流体在简化孔隙模型中的流动特征, 分析黏弹性流体与牛顿流体在流

动过程中产生的差别, 通过可视化试验考察黏弹性流体驱油时存在的微观力及微观力对残余油的作用。

1 油藏孔隙与黏弹性流体简化模型

黏弹性聚合物溶液能提高采收率, 对于黏弹性流体在多孔介质中的流动行为, 现有的理论还不能充分解释黏弹性聚合物溶液在多孔介质中产生的一些特殊现象, 尤其是关于黏弹性聚合物溶液能够比

收稿日期: 2008-09-11

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展计划项目(2005CB221300)和国家科技重大专项(2008ZX05009-004-01)

作者简介: 夏惠芬(1962-), 女(汉族), 辽宁丹东人, 教授, 博士, 主要从事提高采收率原理与技术研究。

水驱进一步提高采收率并能使水驱不动的残余油产生流动的问题。因此,对几种典型的油藏孔隙进行了简化。通过研究油藏条件下黏弹性流体在简化模型内的流动规律,分析黏弹性聚合物溶液在油藏孔隙介质中的流动状况,从而解释黏弹性流体使残余油流动的原因。

1.1 油藏孔隙简化模型

残余油在油藏内的分布是不连续的,存在的形

态多呈孤立的膜状、滴状、柱状、盲端状、簇状等。残余油的形态和存在位置受岩石孔隙结构的影响。

(1)收缩流道和收缩、扩张流道模型。见图1(a)和图1(b),流道反映了聚合物溶液因孔隙截面突变而产生的黏弹效应及残余油在孔径变化拐角处的存在形式。

(2)“T”型流道模型。见图1(c),流道反映了盲端类残余油的存在形式。

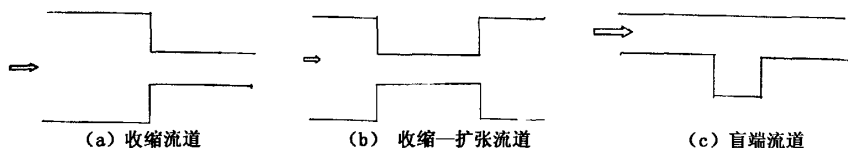


图1 简化孔隙模型

Fig.1 Simplified pore models

1.2 黏弹性流体模型

已有的一些聚合物溶液的流变性研究表明^[10],第二法向应力差明显小于第一法向应力差。在剪切速率为 $100 \sim 700 \text{ s}^{-1}$ 时,第二与第一法向应力差之比从0.1变化到0.7;当剪切速率低于一个量级时,两应力差之比约为0.1~0.3。聚合物溶液在地层中渗流时,流速平均为 1 m/d ,剪切速率一般低于 10 s^{-1} ,则两应力差之比更低。因此,上随体 Maxwell 模型的两应力差之比与实际情况比较符合,更适合描述油藏条件下以第一法向应力差为主要特征的黏弹性聚合物溶液在多孔介质中的流动。上随体 Maxwell 本构方程(UCM)如下:

$$T^{ij} + \lambda \frac{\delta}{\delta t} T^{ij} = \eta A^{ij}. \quad (1)$$

式中, λ 为松弛时间; η 为流体黏度; T 为应力张量; A 为应变速度张量; $\frac{\delta}{\delta t}$ 为 Oldroyd 导数。

2 聚合物溶液在简化孔隙流道中的流动特征

2.1 基本方程组

在二维笛卡尔坐标系中,UCM 流体做等温、定常流动, u, v 分别为速度在 x, y 方向上的分量,不计质量力,以物理分量的形式表述的无因次方程如下^[11-14]:

(1)连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

(2)动量方程

$$Re \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial T^{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T^{xy}}{\partial y}, \quad (3)$$

$$Re \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial T^{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T^{yy}}{\partial y}, \quad (4)$$

流函数,涡量函数与速度分量的关系为

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \Omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (5)$$

代入式(2)~(4)中,得到

$$\nabla^2 \Psi = -\Omega, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} + Re \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{\partial \Omega}{\partial y} - \frac{\partial \Psi}{\partial y} \frac{\partial \Omega}{\partial x} \right) = \\ & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (T^{xx} - T^{yy}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T^{xy} + \\ & \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y^2} - \frac{\partial^3 u}{\partial y^3}, \end{aligned} \quad (7)$$

令

$$A_1 = 1 - 2We \frac{\partial u}{\partial x}, A_2 = 1, A_3 = 1 - 2We \frac{\partial v}{\partial y},$$

$$B = We \frac{\partial u}{\partial y}, C = We \frac{\partial v}{\partial x}, F_1 = 2 \frac{\partial u}{\partial x},$$

$$F_2 = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, F_3 = 2 \frac{\partial v}{\partial y},$$

代入方程(1)的物理分量式中,并简化为

$$\begin{cases} A_1 T^{xx} + We \left(u \frac{\partial T^{xx}}{\partial x} + v \frac{\partial T^{xx}}{\partial y} \right) = 2BT^{xy} + F_1, \\ A_2 T^{xy} + We \left(u \frac{\partial T^{xy}}{\partial x} + v \frac{\partial T^{xy}}{\partial y} \right) = CT^{xx} + BT^{yy} + F_2, \\ A_3 T^{yy} + We \left(u \frac{\partial T^{yy}}{\partial x} + v \frac{\partial T^{yy}}{\partial y} \right) = 2CT^{xy} + F_3. \end{cases} \quad (8)$$

式中, We 为威森博格数, $We = 0$ 为牛顿流体, $We > 0$

为黏弹性流体; Re 为雷诺数; T^{xx}, T^{xy}, T^{yy} 为 T 的物理分量; p 为压力。

方程(6)~(8)结合边界条件用有限差分法求解。流函数用中心差分方法离散,差分方程采用高斯-赛德尔迭代。应力的相对偏差可达到 10^{-6} , 涡量、流函数各分量的相对偏差达到 10^{-3} 。

2.2 聚合物溶液的流动特征

油藏条件下,一般认为聚合物溶液的密度与水的密度相同,约为 990.0 kg/m^3 , 聚合物溶液的黏度介于 $0.6 \sim 50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 孔隙直径为 $1 \sim 10 \text{ } \mu\text{m}$, 假设聚合物

溶液在孔隙内的真实流速介于 $0.1 \sim 5 \text{ m/d}$ 。根据这些参数,可得到油藏条件下的 Re 一般小于 10^{-3} [14]。 We 数受聚合物溶液相对分子质量、质量浓度的影响,其取值为 $10^{-2} \sim 10$ 。文中 We 数取 $0 \sim 0.4$ 。

图 2 中给出了雷诺数 $Re = 10^{-3}$ 时,不同黏弹性流体在收缩流道内流动时,整个流场的流函数和速度分布。由图可见,随着 We 的增加,这些等值线的位置依次向边角处移动。即随着黏弹效应的增加,在边角处的流动速度大于纯黏性流体的流动速度。

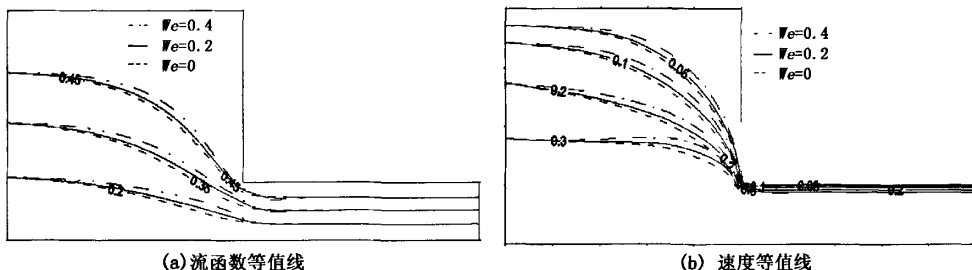


图 2 黏弹性流体在收缩流道中的流场变化

Fig. 2 Flow field variation of viscoelastic fluid in contractive flow channels

3 微观力的提出

在实际油田开发过程中,大多不能显著提高油田深部的压力梯度,而国际上公认的驱油机制在压力梯度保持恒定时成立,分析黏弹性对驱油效率的影响时,驱替压力梯度也应保持恒定。驱替液携带残余油的压力梯度永远等于驱替液的压力梯度,因此若增加驱替液对残余油的携带力,驱替压力梯度也会增加。

化学驱的驱替液段塞比较大,一般会充满大部分油藏,因此驱替液性质(如其黏弹性等)对整个油藏都有类似的影响,不可能局部起作用。所以若油藏深部局部位置的压力梯度增加则其他部位的压力梯度也必然增加,油井和水井之间的总压差也会增加。

现实中很难使油井和水井之间的总压差大幅度的增加,所以研究驱油机制时,国际上公认的标准是压力梯度要恒定并接近油藏深部的实际压力梯度,但允许由于注入压力的提高而使井眼附近局部压力梯度增加并因此增加局部的驱油效率(但这几乎不影响整个油藏的驱油效率)。

对黏弹性的聚合物溶液在简化流道中的流动特性(图 2)分析表明,聚合物溶液的弹性改变了聚合物溶液在孔道中的受力状态,增加了变径孔道边角处和盲端中流体的流速,这就有可能使聚合物溶液

驱油时的压力增加。聚合物驱的室内试验和现场试验均表明,聚合物驱没有显著地增加压力梯度,定义在油层中存在一个不会提高宏观压力梯度的作用力,即微观力[15]。

图 3 给出了残余油的变形及剥离过程。可以看出,在残余油团的最前部都会有一个突出部位以便产生一个毛管力平衡后面的驱动力。当油团的突出部位阻挡驱替液的流动时,流速在这些突出部位的变化最大,由于流速的改变(ΔV)所产生的微观力的改变($\Delta F = \Delta V \cdot m/t$)也在这些部位最大。所增加的微观力将作用在这些残余油团的突出部位,使突出部位变形或向前移动并与主残余油团分离,产生一个新的、可以向前运移的油滴。

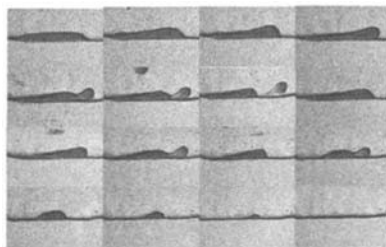


图 3 残余油的变形及剥离过程

Fig. 3 Deformation and mobilization process of residual oil

在二维岩心中,微观液流在不同位置的方向和流速都会改变,但是在岩心中,这些改变的力的总和几乎等于零。微观力(ΔF)的方向与 ΔV 相反,大小与 ΔV 成正比。因此, ΔF 在不同位置也会与 ΔV 相似发生随机变化,岩心中微观力的总和也几乎等于零。微观力大小的改变不会影响宏观压力梯度,压力梯度仍然可保持常数。在宏观力保持不变条件下,不同流体所产生的流线和微观力可以改变。当聚合物驱时,即使压力梯度不变,这些微观力的方向和大小也会发生变化,与水驱时的微观力不同,作用在油团突出部位微观力的变化,会使这些突出部位变形、重新改变油团的形状并运移。

4 微观力对残余油的驱替试验

利用玻璃刻蚀的微观简化孔隙模型(40 mm × 40 mm),通过图像采集系统将驱油过程的图像转化为计算机数字信号,采用图像分析技术研究 HPAM 和甘油溶液的微观驱油特性和驱油效率。试验设备、试验流程及试验条件见文献[4]。

4.1 连续驱替油湿岩心中的盲端类残余油

连续驱替是指水驱后继续注入化学剂驱。图4中给出了水驱后继续葡萄糖驱(牛顿流体)和继续聚合物溶液驱(黏弹性流体)后盲端中的残余油图片。为了对比相同压力梯度条件下的黏弹性聚合物

溶液的驱油效果,葡萄糖溶液与聚合物溶液的黏度基本相同,即聚合物溶液和葡萄糖溶液驱替时具有相同的压力梯度。由图4可见:随着驱替液黏度的增加,盲端中残余油量减少;随着溶液弹性的增加,盲端中残余油量减少;黏弹性的驱替液可以驱替出葡萄糖溶液驱替后的残余油。



图4 不同驱替液连续驱替“油湿”盲端类残余油的效果

Fig. 4 Effects of different driving fluids flooding on dead end residual oil in "oil-wet" cores

4.2 对残余油膜的作用

图5中分别给出了聚合物溶液和甘油溶液驱替后的残余油膜对比图片。从图中可以看出,随着聚合物溶液质量浓度的增加,残余油膜的厚度减小,而相同孔中的甘油驱后的残余油膜的厚度下降幅度较小,即聚合物溶液驱后的油膜类残余油驱替效率比甘油溶液大,剩余的残余油膜厚度比甘油溶液的小。对比图5(a)和(b),不同质量浓度的聚合物溶液的黏度与甘油驱对应图片的黏度相当,即相同压力梯度条件下的聚合物溶液对残余油膜的作用效果好于甘油溶液的。

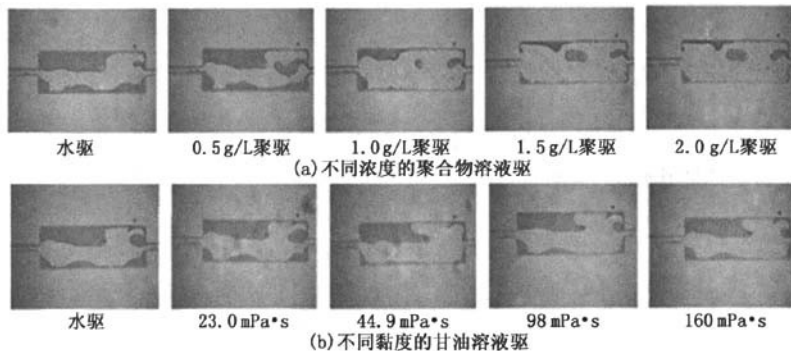


图5 不同驱替液连续驱替残余油膜的效果

Fig. 5 Effects of different driving fluids flooding on residual oil films

4.3 对油滴和柱类残余油的作用

图6中分别给出了黏弹性驱油体系对水湿和油湿孔道中残余油滴和油柱的驱替过程,图中箭头所指方向为流体的流动方向。对岩心中的这类水驱残余油,文献[4]已经证明了此类残余油不能被驱替出来,但整个残余油团经常还是可以移动和富集的。此时整个残余油团向前移动的原因是由于驱替液的流速改变而引起残余油团突出部位的移动,因此其

移动方向永远与该孔道中液流的方向相同,流速变化产生微观力。黏弹性流体化学驱所增加的微观驱动力都将首先“推动”残余油团的“斜坡”和“突出”部位的油。“斜坡”中的一部分油将被推到突出部位,使突出部位油的形状变化更趋向于一个油滴,使以后的驱替液流动方向和速度发生变化,由速度变化产生的微观驱动力更进一步使突出部位变形直至和油团分离,形成一个新的、可以向前移动的、独立

的油滴。当这一部位形成了一个新的独立小油滴以后,油团仍然留在原处的残余油会补充前端突出部位原油的减少,这个过程将重复使整个油团向前移动。在这个过程中,油团不是从后面被推动向前移动的,而是油团后部的油必须补充前端突出部位原油的减少,以便形成一个具有新突出部位的油团,这

一个新油团的突出部位应产生一个毛管力抵消驱动力压力梯度的影响。这个过程看起来好像是后端的油是被前端的油“拉动”的,实际上后端油的移动主要是由于小油滴从油团分离后,油团的毛管力需要重新调整而产生的,重新调整的毛管力必须永远与驱动力相平衡,这个过程同时又会使残余油团产生移动。

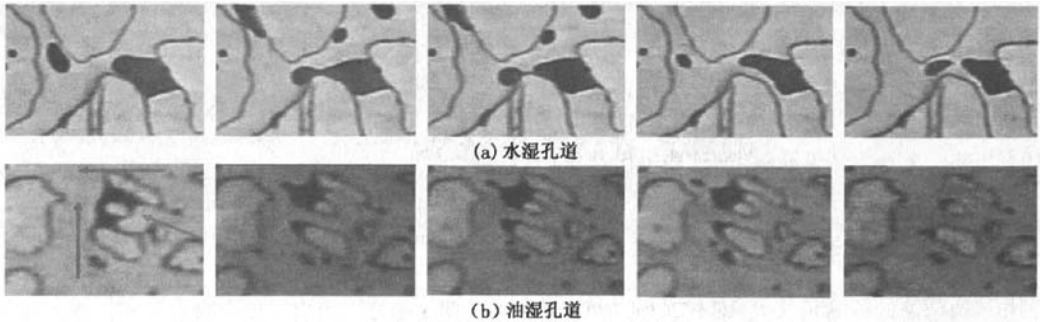


图6 二元体系驱替过程

Fig. 6 Flooding process of binary system

上述过程可以多次重复,直至整个油团变成许多小的、可以移动的油滴,或者油团变得很小,作用在突出部位的微观驱动力不能从油团的后面汇集足量的油,以形成足够大直径的突出部位(同时也是足够小的毛管滞留力)来形成另一个独立的油滴,此时宏观和微观驱动力将和毛管滞留力相平衡,形成一个新的、比原来小的、不能再移动的残余油团。上述现象的累加效果是使岩心的残余油饱和度下降,驱油效率增加。

4.4 对簇类残余油的作用

图7中给出了黏弹性的聚合物溶液和无弹性甘油溶液对簇类残余油的作用。可以看出,黏弹性的聚合物溶液对簇类残余油的作用效果非常明显,而无弹性的甘油对簇类残余油几乎没有作用。图7(a)和(b)中对应的驱替液黏度基本相同,即在相同的压力梯度条件下,黏弹性驱替液的驱油效率高于无弹性驱替液甘油的。可以看出簇状油团外围的油先被启动,油团缩小到一定程度后驱替液可能穿过油团而将油团分成许多“块”。

这类“油簇残余油团”是由很多“油滴”或“油柱”组成的,在其最前端也必然有一个突出部位形成毛管滞留力抵消驱动力。因油簇跨越的长度大,而驱替压力梯度不变,因此作用在油簇的驱动力比“油滴”和“油柱”的驱动力大(驱动力与长度成正比)，“油簇”最前端突出部位的形状变化更趋向于一个油滴。由于“可变直径活塞”效应,黏弹性流体流束边缘的流速和质量流量都高,因此黏弹性流体比牛顿流体的流线在这些部位所改变的程度要大,

所产生的推动这些突出部位的微观力也大,这有利于残余油的移动并富集。

压力梯度是从后面推动残余油团以克服前面的毛管滞留力使残余油团移动,而微观推力是从侧面(与毛管滞留力有一定的角度)推动突出部位的油,为了克服阻止油团移动的毛管滞留力以使残余油团移动,所需的微观力一般要比所需要的宏观驱动力小。

由流线改变而产生的微观力不影响宏观压力梯度。在一维岩心中,驱替液的平均流速和动能一般是恒定的。在不同部位微观流速和动能的方向和大小是会改变的,但这些变化是随机的,随机的变化会互相抵消,使平均流速和总动能保持恒定。压力梯度应该等于宏观力和微观力的总和,但由于微观力的总和等于零,因而压力梯度不受微观力的影响,压力梯度只等于宏观力的总和。在总压差不变的条件下,在岩心中微观力可以改变,而宏观压力梯度不变。

这些试验均给出了黏弹性的驱替液对各类残余油的作用效果,在相同的驱替液黏度情况下,黏弹性流体驱的驱油效率高于无弹性的牛顿流体的驱油效率,进一步证明了驱油效率与作用在残余油团的滞留力以及驱替液的弹性有关。对一定的液体-岩石系统,牛顿驱替液的驱油效率只与其压力梯度和滞留力的比值有关,当驱替液是非牛顿流体时,两种流体的流线不同,因而所产生的微观力不一定相等,此时,微观力是一个独立的变量。因此,用非牛顿驱替液时,宏观力和微观力所产生的驱油作用必须分别考虑,即非牛顿流体的性质会影响驱油效率。

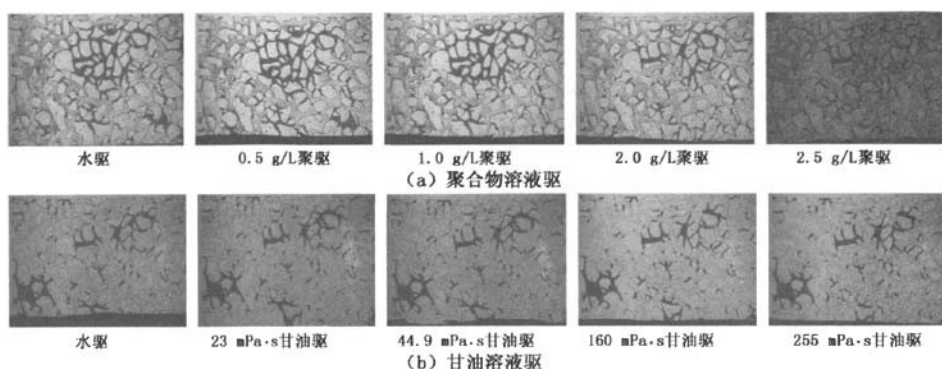


图7 甘油驱和聚合物溶液驱的对比图片

Fig.7 Comparison of polymer flooding and glycerin flooding

5 结 论

(1) 黏弹性的聚合物溶液在不增加驱替压力梯度的情况下,可以驱替出各种类型的残余油。

(2) 宏观压力梯度是由驱替液的黏滞力产生的,是有一定方向性的连续的场力,作用在整个流动空间。

(3) 微观力是由驱替液速度导致动能变化而产生的(与黏度无关),作用于残余油团突出部位,使突出部位移动,微观力没有固定方向,作用在系统不同部位的点上,其累加值等于零。

(4) 聚合物溶液的弹性改变了聚合物溶液在孔道中的受力状态和流体的流速,由此而产生的微观力增加了携带能力,从而提高微观驱油效率。

参考文献:

- [1] WANG Yu-pu, LIU He. Commercial success of polymer flooding in daqing oilfield—lessons learned [R]. SPE 100855, 2006.
- [2] YANG Fu-lin, WANG De-min, YANG Xi-zhi, et al. High concentration polymer flooding is successful [R]. SPE 88454, 2004.
- [3] DU Y, GUAN L. Field-scale polymer flooding: lessons learned and experiences gained during past 40 years [R]. SPE 91787, 2004.
- [4] 夏惠芬,王德民,王刚,等. 聚合物溶液在驱油过程中对盲端类残余油的弹性作用[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 72-76.
XIA Hui-fen, WANG De-min, WANG Gang, et al. Elastic behavior of polymer solution to residual oil at dead-end [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 72-76.
- [5] 王刚,王德民,夏惠芬,等. 聚合物溶液的黏弹性对残余油膜的作用机理研究[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 28(6): 25-30.

- WANG Gang, WANG De-min, XIA Hui-fen, et al. Effect of viscoelasticity of HPAM solution on residual oil film [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 28(6): 25-30.
- [6] 王德民,程杰成,吴军政,等. 聚合物驱油技术在大庆油田的应用[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 74-78.
WANG De-min, CHENG Jie-cheng, WU Jun-zheng, et al. Application of polymer flooding technology in Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 74-78.
- [7] WANG De-min, CHENG Jie-cheng, YANG Qing-yan, et al. Viscous-elastic polymer can increase microscale displacement efficiency in cores [R]. SPE 63227, 2000.
- [8] 夏惠芬,王德民,刘仲春,等. 黏弹性聚合物溶液提高微观驱油效率的机理研究[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 60-65.
XIA Hui-fen, WANG De-min, LIU Zhong-chun, et al. Study on the mechanism of polymer solution with viscoelastic behavior increasing microscopic oil displacement efficiency [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 60-65.
- [9] 兰玉波,杨清彦,李斌会. 聚合物驱波及系数和驱油效率实验研究[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 64-68.
LAN Yu-bo, YANG Qing-yan, LI Bin-hui. Experimental research on sweep efficiency and oil-displacement efficiency of polymer flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 64-68.
- [10] 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, 2000: 72-73.
- [11] BIRD R B, ANMSTRONG R C, HASSAGER O, et al. Dynamics of polymeric liquids, Kinetic theory [M]. New York: New York Press, 1977.
- [12] YIN Hong-jun, WANG De-min, ZHONG Hui-ying. Study of flow behavior of viscoelastic polymer solution in micropore with dead end [R]. SPE 101950, 2006.

(下转第160页)

- [3] 邓述波,周抚生,陈忠喜,等.聚丙烯酰胺对聚合物驱含油污水中油珠沉降分离的影响[J].环境科学,2002,23(2):69-72.
DENG Shu-bo, ZHOU Fu-sheng, CHEN Zhong-xi, et al. Effects of polyacrylamide on settling and separation of oil droplets in polymer flooding produced water[J]. Environment Science, 2002,23(2):69-72.
- [4] 康万利,岳湘安,胡靖邦.含聚合物油水乳状液的聚结特性[J].油气田地面工程,1995,14(2):28-30.
KANG Wan-li, YUE Xiang-an, HU Jing-bang. Coalescence characteristics of oil-water emulsion containing polymer[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 1995, 14(2):28-30.
- [5] 郑忠.胶体科学导论[M].北京:高等教育出版社,1989.
- [6] 郭继香.原油界面活性组分性质及乳化性能研究[D].北京:石油大学化工学院,2004.
- [7] 朱玉霞,汪夔清.我国原油中的钙含量及其分布的初步研究[J].石油学报,1998,14(3):57-60.
ZHU Yu-xia, WANG Xie-qing. The study of calcium content and its distribution in domestic crude[J]. Acta petrolei sinica,1998,14(3):57-60.
- [8] 王慧云,防洪波,吴肇亮.石油磺酸盐对胜利油田原油、胶质、沥青质界面性质的影响[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(2):112-116.
WANG Hui-yun, FANG Hong-bo, WU Zhao-liang. Influence of petroleum sulfonate on interfacial properties of crude oil, resin and asphaltene from Shengli Oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(2):112-116.
- [9] 赵国玺,朱瑶.表面活性剂作用原理[M].北京:中国轻工业出版社,2003.
- [10] 王振宇,李本高,王京,等.一种含磺酸的有机磷羧酸的合成与结构表征[J].工业水处理,2001,21(5):23-26.
WANG Zhen-yu, LI Ben-gao, WANG Jing, et al. Synthesis and structure identification of a novel organophosphorous containing sulfonic group as scale inhibitor[J]. Industrial Water Treatment, 2001,21(5):23-26.
- [11] CHAIRES G. Inhibition of scale formation and corrosion by sulfonated organophosphonates: US, 52214871[P]. 1993-06-22.
- [12] 王晓东,王仁远.三元共聚合高吸水性树脂的研究[J].化学工程师,2001(4):1-3.
WANG Xiao-dong, WANG Ren-yuan. Study on the copolymerization of acrylic acid and acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid for high water absorbency resin[J]. Chemical Engineering, 2001(4):1-3.
- [13] 顾惕人,朱走瑶,李外朗,等.表面化学[M].北京:科学出版社,2001:116.
- [14] SHERMAN P. Emulsion Science[M]. London and New York: Academic Press, 1968:323.

(编辑 刘为清)

(上接第155页)

- [13] 岳湘安,张立娟,刘中春,等.聚合物溶液在油藏孔隙中的流动及微观驱油机理[J].油气地质与采收率,2002,9(3):4-6.
YUE Xiang-an, ZHANG Li-juan, LIU Zhong-chun, et al. Viscoelastic flow and microscopic displacement mechanism of polymer solution in reservoir pores[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2002,9(3):4-6.
- [14] 张立娟.黏弹性流体在油藏孔隙模型中的流动及对微观驱油效率的影响[D].大庆:大庆石油学院石油工程学院,2001.
- [15] 王德民,王刚,吴文祥,等.黏弹性驱替液所产生的微观力对驱油效率的影响[J].西安石油大学学报:自然科学版,2008,23(1):43-55.
WANG De-min, WANG Gang, WU Wen-xiang, et al. Influence of the micro-force produced by viscoelastic displacement liquid on displacement efficiency[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008,23(1):43-55.

(编辑 刘为清)