

doi:10.3799/dqkx.2017.542

# 粘弹性聚合物驱普通稠油微观渗流数学模型

钟会影, 张伟东, 刘义坤, 尹洪军\*

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

**摘要:** 我国海上稠油资源比较丰富, 但由于受到海上条件等因素限制, 聚合物驱成为提高海上稠油采收率的主要方法. 因此深化聚合物溶液驱稠油微观渗流机理对于进一步提高采收率具有十分重要的意义. 目前关于粘弹性聚合物渗流机理的理论研究主要局限于弹性聚合物溶液的单相流体在微观孔道内流动特征研究, 而针对粘弹性聚合物、油两相流体渗流机理的研究甚少, 特别是针对稠油聚合物驱的相关研究未见报道. 为此, 借助于计算方法较为成熟的 OpenFOAM 开源平台开展了聚合物驱稠油两相流体渗流机理的研究; 以收缩孔道为微观物理模型, 建立了粘弹性聚合物溶液、普通稠油两相渗流连续性方程、运动方程及本构方程, 并采用 VOF(volume of fluid)界面追踪方法建立两相界面相方程; 以 OpenFOAM 开源平台为基础, 开发了粘弹性流体、幂律流体两相流体求解器; 绘制了不同弹性聚合物溶液在微观孔道内驱油的饱和度分布、速度分布及应力分布特征. 结果表明, 相对于水驱, 纯粘性聚合物溶液前缘突破时间慢, 波及面积大, 驱油效率高. 相比于同等粘度的纯粘性聚合物溶液, 粘弹性聚合物的弹性有助于挖潜凸角内的残余油, 聚合物溶液的弹性越大, 稠油驱油效率越高. 随着聚合物溶液弹性的增强, 第一法向应力增大, 当聚合物溶液进入到孔道突变处时, 其弹性发挥的作用最大, 法向应力的值最大. 研究结果可为矿场实施聚合物驱设计、筛选聚合物溶液提供重要的理论支持.

**关键词:** 粘弹性聚合物; 法向应力; 两相流动; OpenFOAM; 驱油效率; 石油地质.

**中图分类号:** P313.5

**文章编号:** 1000-2383(2017)08-1364-09

**收稿日期:** 2017-01-12

## The Micro-Flow Mathematical Model Study on Viscoelastic Polymer Displacement Viscous Oil

Zhong Huiying, Zhang Weidong, Liu Yikun, Yin Hongjun\*

Key Laboratory for Enhanced Oil & Gas Recovery of the Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

**Abstract:** With the development of economy and the rising demand for oil resources, the exploitation of viscous oil, bitumen and oil shale is an important challenge for the oil industry while the recoverable reserves of conventional crude is decreasing constantly. The viscous oil resources of our country is rich, but the polymer flooding is the main method enhancing viscous oil recovery due to restrictions of non-available steam generation facilities off-shore. So it is significant to study on micro flow mechanism deeply for further enhancing viscous oil recovery. The existing study on the polymer flow mechanism is mainly limited to the single phase flow in micro pore, and little study of viscoelastic polymer and oil two-phase flow characteristic has been done especially with viscous oil. In this study, we develop two phases of viscoelastic polymer and viscous oil solver on the OpenFOAM platform based on computational fluid dynamics, and we study the mechanism of viscoelastic polymer flooding viscous oil based on the solver. In this paper, the contraction model and mathematical model is established, including the continuity equation, momentum equation and constitutive equation of two phases, and interface equation solved by VOF (volume of fluid) method. The solver of viscoelastic and power law fluid is developed based on OpenFOAM. The saturation, velocity and stress distribution is drawn with different elastic polymer solutions. The results show that the front breakthrough time is slower, the sweep efficiency is larger and displacement efficiency is higher than water flooding. The elasticity of polymer can enhance oil recovery. The larger is the elasticity, the smaller the dead oil area in convex corner. The stronger of elasticity is,

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(No.51604079); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(No.UNPYSCT-2016126).

**作者简介:** 钟会影(1981-), 女, 副教授, 主要从事油气渗流理论与应用研究. ORCID: 0000-0001-5429-4380. E-mail: zhhy987@126.com

\* **通讯作者:** 尹洪军, ORCID: 0000-0001-9165-6416. E-mail: yinhj7176@126.com

**引用格式:** 钟会影, 张伟东, 刘义坤, 等, 2017. 粘弹性聚合物驱普通稠油微观渗流数学模型. 地球科学, 42(8): 1364-1372.

the lager of normal stress is. The elasticity can make the most of displacement oil when the polymer flows in contraction of the model. The results of this paper can supply the theoretical support basis on polymer design and filter, it is significant for implementation of polymer flooding in oil field.

**Key words:** viscoelastic polymer; normal stress; two phase flow; OpenFOAM; displacement efficiency; petroleum geology.

## 0 引言

随着人类和社会经济发展对石油资源的高需求以及常规原油可采储量的不断减少,稠油、沥青及页岩油的开发、开采对于整个石油工业来说具有重要的战略意义.根据美国能源部的报告,全世界  $9 \times 10^{12} \sim 13 \times 10^{12}$  桶的石油地质储量中仅有 30% 为常规原油,40% 是稠油和超稠油,剩余 30% 的储量则为页岩油和沥青(Doorwarand Mohanty, 2011).我国的稠油资源也是比较丰富的,其主要分布在辽河油田、胜利油田、渤海油田、新疆油田等地域,其中陆上稠油、沥青资源占到石油总量的 20% 以上,探明控制储量为  $7.95 \times 10^{10}$  t,探明稠油地质储量为  $2.06 \times 10^{10}$  t(苏映宏, 2009),成为继美国、加拿大和委内瑞拉后的第四大生产稠油的国家.然而,由于受到热、蒸汽和溶剂的限制,当油藏处于寒带或高寒带区域,同时油藏物性为薄油层时其热损失较大,或者当海上油田缺少配套的蒸汽发生器时,这些传统的热采方法从经济及工艺可操作性的角度上都存在局限(Sheng *et al.*, 2015).然而稠油水驱的采收率一般低于 20%,甚至有些油藏低于 10%(Meyer and Attanasi, 2003; Beliveau, 2009).聚合物驱由于具有改善流度比的优势,以及在提高常规原油采收率中的成功实践,其已成为除传统热采外的另外一种提高稠油采收率的化学驱方法.前人以大量的实验研究为基础,认为适合聚合物驱油藏的原油地层粘度应小于  $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,含油饱和度应高于 30%,渗透率应大于 20 mD,厚度应大于 3 m,且地层温度须低于  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (Lake *et al.*, 1992; Alkafeef and Zaid, 2007; Gao and Towler, 2011).然而, Jones(1980)统计给出了全世界 9 个地层原油粘度均高于  $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  的油田采用聚合物驱均取得了较好开发效果的案例.我国海上已发现各类储量  $6.1 \times 10^{10}$  t,其中以渤海海域为主,占总储量的 2/3 左右,这其中有 70% 的储量属于稠油,平均地层原油粘度为  $70 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,主要采用聚合物驱提高海上普通稠油采收率(Zhou *et al.*, 2008; 周守为, 2009).关于聚合物溶液的驱油机理也一直丰富和深化,同时也相应促进着该驱油技术的不断发展.宏观上的机

理解释已成共识,主要靠增加水相的粘度,降低油水流量比来提高原油采收率.然而,大量的研究就粘弹性聚合物溶液对油丝的“拉、拽”、对油膜的“剥离”、以及“表观增稠”贡献于驱油的相关机理进行了分析和阐述(Maerker, 1975; Jones, 1980; Maerkerand Sinton, 1986; Schroeder *et al.*, 2003; Seright *et al.*, 2011).研究表明当粘弹性聚合物溶液在等径的毛管中流动时,溶液的粘性起主要作用(Zheng *et al.*, 2016),但当其流经多孔介质时,由于流道形状和孔径时刻变化,弹性行为出现,即使毛管数低于临界毛管数,残余油滴也能够发生运移.王德民等(2000)、尹洪军等(2009)对比研究了水驱、甘油驱及聚合物驱后的残余油分布,结果表明在粘弹性聚合物溶液驱替后,所有类型的微观残余油均减少,证实了微观驱油效率的提高与聚合物溶液的弹性有关.王德民等(2002)、夏惠芬等(2001)也通过对比等粘性的甘油、聚合物驱原油的微观渗流实验,验证了聚合物溶液的弹性可以提高原油的采收率.岳湘安等(2002)、Yin *et al.*(2012)、Zhong *et al.*(2012)也通过流体力学计算方法研究了聚合物溶液单相在凹槽等简化孔道内的流动流函数及速度等值线,发现聚合物弹性能够扩大其在多孔介质内的波及面积,进而提高波及效率.但目前理论研究均立足于聚合物溶液单相渗流机理,聚合物、油的两相渗流机理的研究较少,弹性对稠油驱油效率的研究也很少有涉及,因此本文以海上油田为背景,利用流体力学计算方法开展粘弹性聚合物驱普通稠油两相渗流机理研究,分析弹性对稠油驱油效率的影响,研究结果为矿场聚合物设计及参数优选提供重要的理论支撑.

## 1 模型的建立

### 1.1 物理模型

实际多孔介质内的形状及连通性非常复杂,正是由于其复杂多变的孔道形状,使得聚合物溶液的弹性在流动过程中发挥作用,这里以收缩孔道为物理模型进行研究,该孔道形状变化更有利于研究聚合物流动过程中弹性对驱油的影响(杨永飞等, 2016).模型利用 OpenFOAM 自带工具进行网格剖

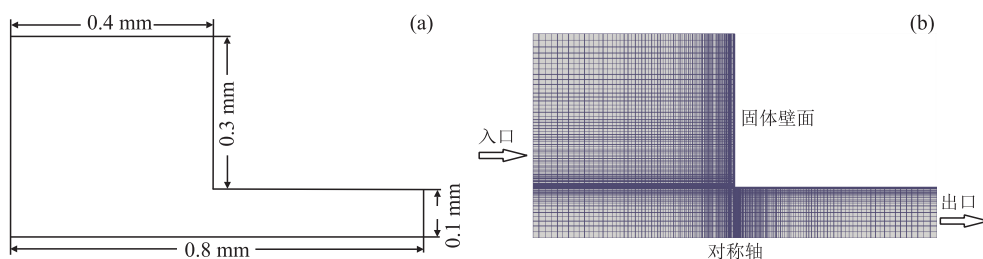


图 1 收缩孔道物理模型

Fig.1 Contraction model and grid partition

a.模型几何尺寸;b.网格模型

分,能够在凹角处进行加密,使得数值计算更易收敛.由于海上油田平均渗透率高于 2 000 mD,对应孔隙半径较大(许青青,2013),孔道半径为 0.02~0.20 mm,兼顾数值计算的收敛性及计算速度,其收缩孔道模型及具体尺寸见图 1.

## 1.2 数学模型

控制方程描述的流体在多孔介质内流动为层流、等温不可压缩流动(蔡建超和郁伯铭,2012;谢毅,2014),包括连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{U}$  为速度矢量, m/s;该速度矢量可以分解为  $x$  方向上的渗流速度  $u$ ,  $y$  方向的渗流速度  $v$ .动量方程为:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad (2)$$

其中, $\rho$  为流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $p$  为流体的压力, Pa;  $t$  为流动时间, s;  $\boldsymbol{\tau}$  为聚合物溶液对应力张量, Pa.

式(1)和式(2)在单相区内,分别代表各自的流体参数,如密度、应力、速度等.同时,数学模型中必不可少的另一个方程为描述粘弹性聚合物与原油应力与应变关系的本构方程.

描述聚合物溶液流变性的本构关系有很多,其中 OldroydB 方程应用较多,本文采用 OldroydB 模型,该方程具有第一法向应力差远远大于第二法向应力差,符合聚合物溶液的流变特征,表达式如下:

$$\boldsymbol{\tau}_p + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p = \eta_0 \mathbf{D}, \quad (3)$$

其中, $\lambda$  为松弛时间, s;  $\eta_0$  为粘弹性聚合物溶液零剪切粘度, Pa·s;  $\mathbf{D}$  为变形速率张量, 1/s;在进行粘弹性聚合物溶液、纯粘性甘油及水流动特征模拟对比时,当驱替液为水时: $\lambda = 0, \eta_0 = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ;当驱替液为甘油时: $\lambda = 0, \eta_0 = \eta_p$ .

根据稠油的流变性实验,采用幂律模式本

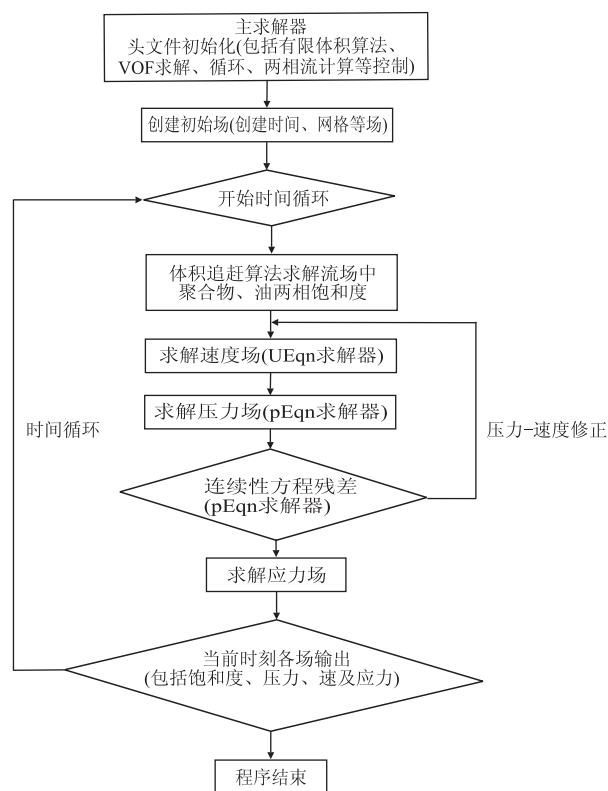


图 2 求解器求解流程

Fig.2 Flow chart of the solver

构方程:

$$\boldsymbol{\tau} = K \dot{\boldsymbol{\gamma}}^n, \quad (4)$$

其中: $K$  为稠度系数,根据稠油流变性,取值为 0.066 9;  $n$  为幂律指数,流变性实验结果为 0.980 6.

这里聚合物、原油两相流动采用 VOF (volume of fluid) 界面追踪方法研究界面变化特征,其相方程可以表达为(刘秀丽等,2015):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = 0, \quad (5)$$

其中, $\alpha$  为两相体积分数.

为了保证数值计算的收敛性,这里采用 DEVSS 方法处理动量方程,将应力部分分为溶剂贡献部分

表 1 收缩孔道两相渗流模拟参数

Table 1 Simulation parameters of two-phase seepage flow for contraction model

模拟方案	油相		驱替相			界面张力 (mN/m)	入口速度 ( $10^{-4}$ m/s)
	密度(kg/m <sup>3</sup> )	粘度(mPa·s)	密度(kg/m <sup>3</sup> )	粘度(mPa·s)	松弛时间(s)		
水驱普通稠油	860	70	1 000	1	—	4.8	1.16
纯粘性聚合物驱普通稠油	962	70	900	40	0.00	4.8	1.16
粘弹性聚合物驱普通稠油	962	70	900	40	0.09	4.8	1.16

和聚合物贡献部分,将聚合物溶液贡献应力分为粘性贡献及弹性贡献(Favero *et al.*, 2010),因此应力张量可以转化为:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_p, \quad (6)$$

其中,  $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s$  为溶剂贡献的应力张量, Pa;  $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_p$  为溶质贡献的应力张量, Pa;  $\boldsymbol{\tau}_s = 2\eta_s \mathbf{D}$ ;  $\boldsymbol{\tau}_p$  可以通过 OldroydB 本构方程计算而得, 其动量方程可以转化为:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\eta_p \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + (\eta_s + \eta_p) \nabla \cdot (\nabla \mathbf{U}) + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_p, \quad (7)$$

其中:  $\eta_s$  为溶剂的粘度, Pa·s;  $\eta_p$  为聚合物的粘度, Pa·s.

上述公式(1)~(7)构成了本文求解的控制方程,采用有限体积方法对上述方程进行数值求解.本文利用 OpenFOAM 已有的两相流体求解器 InterFoam 及单相粘弹性聚合物溶液不稳定流动求解器 ViscoelasticFluidFoam 为基础,编制开发聚合物一稠油两相渗流的求解器,利用此求解器的具体求解过程(图 2)可分为:(1)给出速度及体积分数  $\alpha$  的初始值,采用式(4)求解  $\alpha^*$ , 并利用新的  $\alpha^*$  值计算流体的密度、粘度等物性与流变参数;(2)通过初始的速度场  $\mathbf{u}$ 、压力场  $p$  和应力场  $\boldsymbol{\tau}$ , 显式计算压力梯度、应力散度,在此基础上再采用隐式求解动量方程,计算速度矢量的各分量,进而计算新的速度场  $\mathbf{u}^*$ ; (3)利用所得到新的速度场估算新的压力场  $p^*$ , 从而计算新的速度修正值,进而计算满足连续性方程的  $\mathbf{u}^{**}$ . 计算  $p^*$  和  $\mathbf{u}^{**}$  时采用 PISO 方法;(4)利用修正的速度场  $\mathbf{u}^{**}$ , 通过求解本构方程计算新的应力场  $\boldsymbol{\tau}^*$ ; (5)计算每个时间步,重复计算步骤(1)~(4)以满足精度要求,每次计算后采用新值  $\alpha^*$ ,  $\mathbf{u}^{**}$ ,  $p^*$ ,  $\boldsymbol{\tau}^*$  代替  $\alpha$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $p$ ,  $\boldsymbol{\tau}$  进行迭代.

## 2 渗流特征研究

利用本文所开发的粘弹性流体、幂律流体两相求解器可以计算驱替不同时刻不同弹性聚合物溶液

的渗流规律,包括饱和度分布、速度分布及应力分布等.本文模拟水驱油、纯粘性聚合物驱油及粘弹性聚合物驱油 3 种方案的渗流特征,其具体的模拟方案参数见表 1.利用两相求解器计算上述方案的聚合物驱普通稠油流场,利用该软件自带的后处理软件 Paraview 对结果进行后处理.

### 2.1 饱和度分布特征

首先对比水驱、纯粘性聚合物驱普通稠油相体积分数的变化规律,如图 3 所示,模拟计算条件下,在驱替时刻为 161.7 s 时,水相前缘到达收缩孔道处,在 266.4 s 时,前缘接近模型出口,趋于突破,至 277.6 s 后,孔隙凸角处的含油饱和度不再发生变化,从饱和度分布可以反映出水驱普通稠油非常明显的非活性性.

粘度为 40 mPa·s 纯粘性聚合物溶液驱普通稠油不同时刻的饱和度分布变化如图 4 所示,可以看出,模拟计算条件下,在驱替时刻为 293.1 s 时,聚合物溶液前缘到达收缩孔道处,驱替进行到 303.8 s 后,聚合物溶液完全在收缩孔道中推进,扩孔内的波及面积不断增大,至驱替时刻为 382.0 s 时,聚合物溶液前缘接近模型出口,趋于突破,到 402.4 s 时,波及面积趋于稳定,形成如图 4f 红色区域所示的死油区.

对比收缩孔道水驱和纯粘性聚合物驱普通稠油不同时刻的饱和度变化,笔者发现流度比的差异使水驱前缘推进速度显著快于纯粘性聚合物驱,驱替过程中的非活塞现象更加明显,而纯粘性聚合物驱时前缘移动活塞性强,突破时间也较晚,在两相界面稳定时刻时,纯粘性聚合物驱的残余油区域明显低于水驱.

在对比分析水驱、纯粘性聚合物驱稠油饱和度变化特征的基础上,进一步研究收缩孔道中粘弹性疏水缔合聚合物驱普通稠油的饱和度变化规律,得到了松弛时间为  $\lambda = 0.09$  s 粘弹性聚合物溶液驱普通稠油的饱和度变化,如图 5 所示,由于在模拟计算方案中两相间界面张力不变,因此在粘弹性聚合物溶液进入孔道收缩位置之前(驱替时刻为 293.1 s)



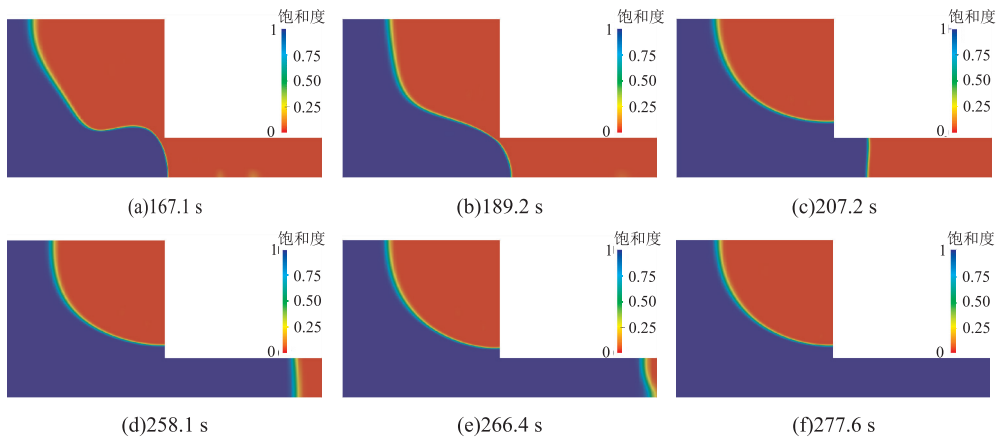


图 3 收缩孔道水驱油不同时刻的饱和度变化

Fig.3 Saturation distribution of water flooding at different time in contraction model

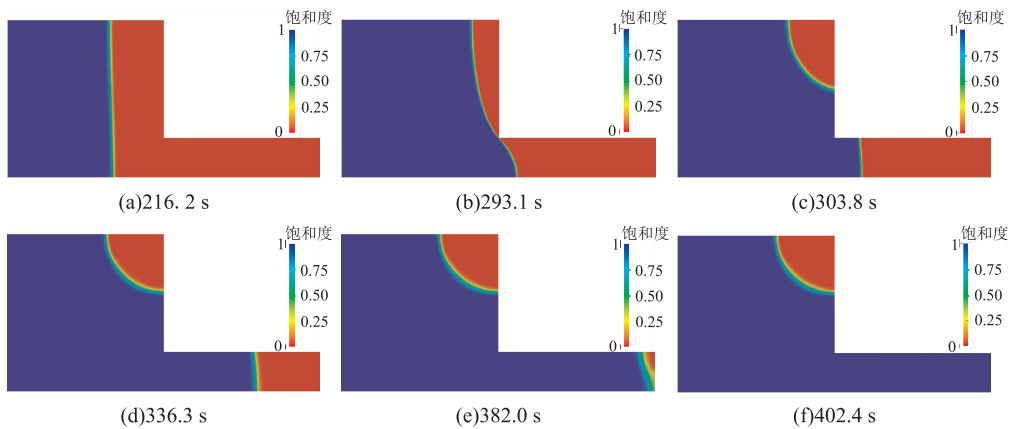
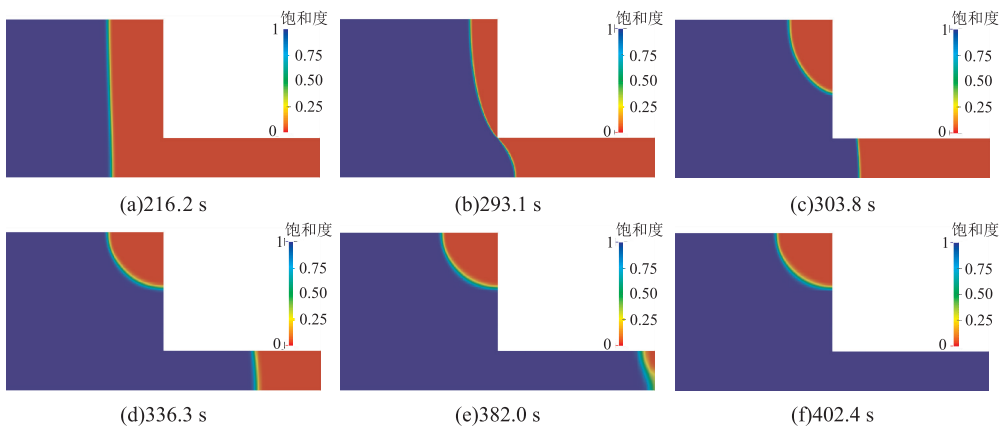


图 4 收缩孔道纯粘性聚合物驱稠油不同时刻的饱和度变化

Fig.4 Saturation distribution of pure viscous polymer flooding at different time in contraction model

图 5 收缩孔道粘弹性聚合物( $\lambda = 0.09$  s)驱稠油不同时刻的饱和度变化Fig.5 Saturation distribution of viscoelastic polymer ( $\lambda = 0.09$  s) flooding at different time in contraction model

的两相界面移动规律相同于纯粘性聚合物驱.在驱替时刻达到 293.1 s 后,也就是前缘到达收缩位置处后,虽然与纯粘性聚合物驱相比(图 4),同一时刻的两相界面位置并无显著差别,但在孔隙凸角处的波

及面积明显增大,这揭示了弹性在发挥作用,聚合物溶液的弹性更有利于挖潜凸角内的剩余油.当两相界面稳定后,所形成的死油区面积也要小于纯粘性聚合物驱(图 5f).与其他弹性条件下的饱和度变化

表 2 收缩孔道不同驱替方式的驱替效率

Table 2 Displacement efficiency of different flooding patterns in contraction model

水驱		纯粘性聚合物驱		粘弹性聚合物驱( $\lambda=0.09s$ )	
驱替时刻(s)	驱替效率(%)	驱替时刻(s)	驱替效率(%)	驱替时刻(s)	驱替效率(%)
161.7	40.20	216.2	52.74	216.2	52.89
189.2	47.56	293.1	73.54	293.1	73.60
207.2	52.82	303.8	75.55	303.8	76.18
258.1	64.39	336.3	82.38	336.3	82.81
266.4	66.44	382.0	88.61	382.0	89.76
277.6	68.26	402.4	91.09	402.4	92.09

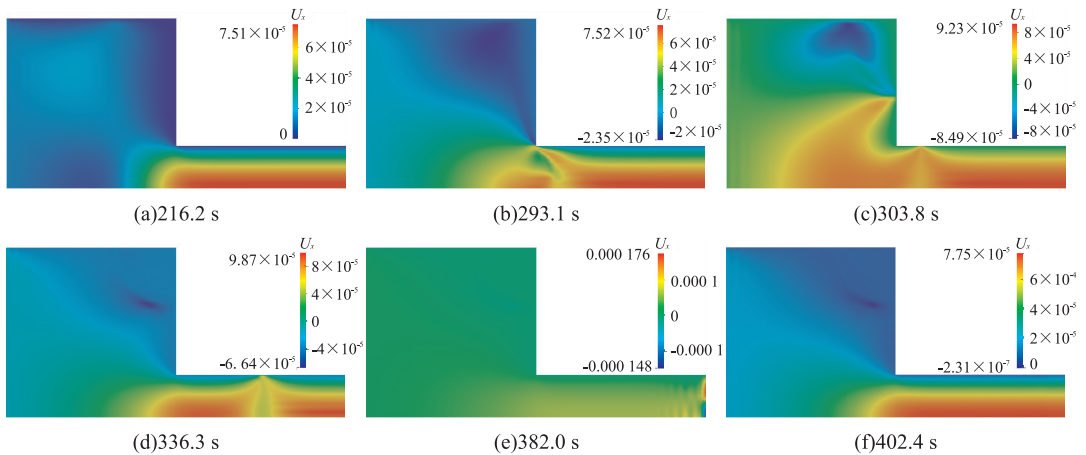


图 6 收缩孔道纯粘性聚合物驱稠油不同时刻的  $x$  方向速度( $U_x$ )变化

Fig.6 Velocity ( $U_x$ ) distribution of pure viscous polymer flooding in  $x$ -direction at different time in contraction model

也呈现相同的特征与规律.

通过对以上求解结果的对比与定性分析,结合图 3~图 5 的饱和度分布变化,利用面积法计算驱替效率,进一步定量描述不同驱替时刻收缩孔道内两相渗流规律:

$$\eta = \frac{A_{\text{pore}} - A_{\text{red}}}{A_{\text{pore}}} \times 100\%, \quad (8)$$

其中: $\eta$  为驱替效率,%; $A_{\text{pore}}$  为孔道面积(初始含油面积), $m^2$ ; $A_{\text{red}}$  为收缩孔道内的红色区域面积(残余油面积), $m^2$ .

计算结果如表 2 所示,与水驱稠油相比,纯粘性聚合物和粘弹性疏水缔合聚合物在不同驱替阶段的驱替效率均要高出 12%~24%,且弹性增大,驱替效率进一步提高,与等粘度的纯粘性聚合物相比,松弛时间为 0.09 s 的粘弹性聚合物溶液可提高采收率 1%.

### 2.2 速度分布特征

利用 Paraview 后处理求解结果,绘制如图 6 所示收缩孔道纯粘性聚合物驱普通稠油不同时刻的主流道即  $x$  方向速度变化.随着驱替过程的进行,中心线上  $x$  方向速度最大值不断增大,表明纯粘性聚合

物在多孔介质内的流动速度逐渐增大.在驱替时刻 303.8 s,即驱替前缘推进到收缩位置处时,扩孔凸角内形成明显的低速区域,造成残余油的滞留.与此同时,当两相前缘达到出口后,即当驱替时间达到 402.4 s后,即当整个孔道内除了残余油只有聚合物溶液单相,而残余油此时为不可流动相,收缩孔隙内只有驱替液单相流动,没有了流动界面,驱替液在孔道内的流动阻力降低,因此流体在流道内的整个流速降低,最大流速也有所降低(图 6f).

同样,对于同等粘度的粘弹性聚合物驱普通稠油,仍以松弛时间 0.09 s 的聚合物的求解结果为例.如图 7 所示,与等粘的纯粘性聚合物驱相比,在驱替时刻 216.2 s 时, $x$  方向速度相差不大,这主要是由于聚合物溶液在等径的孔道内流动,此时聚合物溶液的弹性还没有发挥作用,故此时两相流动速度与纯粘性聚合物驱流动速度相差不大,粘弹性流体把部分压能转化为弹性势能.当驱替前缘推进到收缩位置处时( $t=293.1 s$ ),由于孔道形状发生的突变,聚合物溶液的弹性势能开始转化为动能,使得两相速度增大,即驱替在主流道内,弹性使得流动速度增大.随着前缘在收缩孔道内进一步流动( $t=303.8 s$ ),在

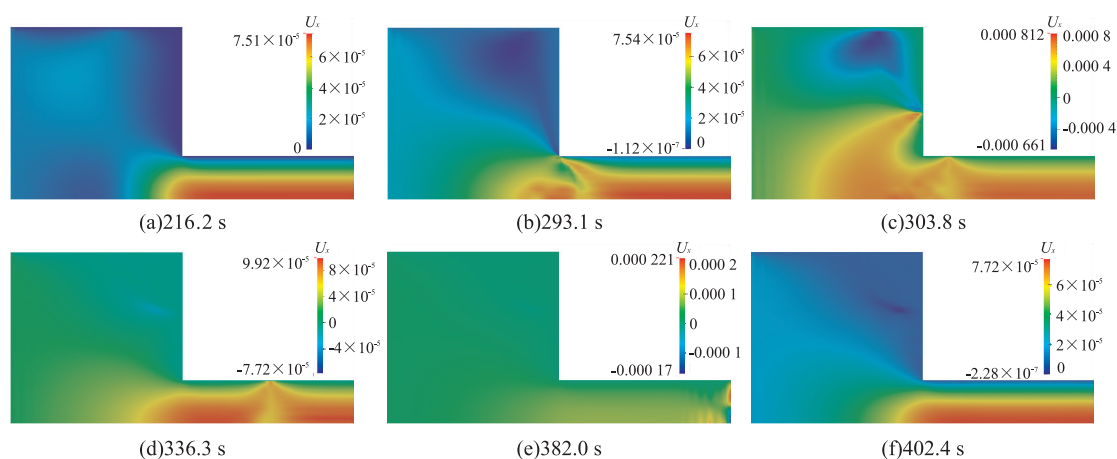


图 7 收缩孔道粘弹性聚合物( $\lambda=0.09$  s)驱稠油不同时刻的  $x$  方向速度( $U_x$ )变化

Fig.7 Velocity ( $U_x$ ) distribution of viscoelastic polymer ( $\lambda=0.09$  s) flooding in  $x$ -direction at different time in contraction model

表 3 第一法向应力( $\tau_{xx}$ )变化对比

Table 3 Comparison of first normal-stress ( $\tau_{xx}$ )

驱替时刻 (s)		216.2	293.1	303.8	336.3	382	402.4
最大第一法向应力	纯粘性聚合物驱	0.060 4	0.381 5	1.152 3	0.295 4	1.182 6	0.035 4
	粘弹性聚合物驱	0.061 3	1.472 2	4.560 1	5.001 2	1.485 3	0.058 1
	最大第一法向应力差(Pa)	0.000 9	1.090 7	3.407 8	4.705 8	0.302 7	0.022 7

扩孔道的凸角区即流动低速区域的反方向速度增大,即  $x$  的负方向速度增大,有利于残余油在凸角内的动用,这些特征均有利于稠油的动用和被驱替.因此会使得凸角内残余油饱和度降低,说明弹性有利于提高收缩孔道内原油的采收率.其他弹性条件下的  $x$  方向速度变化也呈现相同的特征.

### 2.3 应力分布特征

第一法向应力  $\tau_{xx}$  为主流道方向上流体所受到的力,其大小能够反映流体的流动特征.本文计算并对比了纯粘性与粘弹性聚合物溶液第一法向应力变化,得到收缩孔道中纯粘性聚合物及粘弹性聚合物驱普通稠油过程中的最大第一法向应力,如表 3 所示,粘弹性疏水缔合聚合物驱普通稠油过程中的第一法向应力总是高于等粘的纯粘性聚合物驱.当聚合物溶液进入到收缩孔道之前,即驱替时间在  $t=216.2$  s 时,两种流体的最大第一法向应力差值不大,主要原因也是由于在等径孔道内,弹性发挥的作用不大,所以使得两种流体的驱替差异变小.但在  $t=293.1$  s、 $t=303.8$  s、 $t=336.3$  s 的驱替时刻,二者的第一法向应力差开始增大,最终达到最大值 4.71 Pa,也就是说此时弹性发挥的作用最大,这也是此时聚合物溶液的弹性能够进一步挖潜凸角区域残余油饱和度的主要原因.这一特征决定了粘弹性疏水缔合聚合物驱普通稠油过程中对微观驱油效率

更大的贡献.研究表明,聚合物溶液的松弛时间越大,即聚合物溶液弹性越大,与纯粘性聚合物溶液的最大第一法向应力差值越大,对突扩孔道内的残余油饱和度降低幅度越大.两相前缘达到出口时,此时二者的最大第一法向应力差值开始降低,说明两相作用时,弹性能够发挥更大的作用.

## 3 结论

(1) 笔者建立了基于 VOF 界面追踪的粘弹性聚合物驱稠油两相渗流的数学模型,并基于 OpenFOAM 平台对数学模型进行求解.

(2) 与等粘度的纯粘性聚合物溶液相比,聚合物溶液的弹性对前缘突破时间的影响不大,但弹性能够提高聚合物溶液的微观驱油效率,其驱油效率能够提高,相比于等粘度纯粘性聚合物溶液,松弛时间为 0.09s 的聚合物溶液弹性对采收率的贡献为 1%.

(3) 当聚合物前缘推进到收缩位置之前,纯粘性与粘弹性聚合物主流道方向流度差别不大,但当进入收缩位置处,具有弹性聚合物溶液的流动速度明显增大,同时在低速区域的反方向速度增大,有利于滞留区的稠油的动用与驱替,从而降低含油饱和度.

(4) 随着聚合物溶液的弹性的增加,第一法向应力增大,当两相界面达到收缩处,第一法向应力最

大,此时聚合物溶液的弹性发挥的作用最大。

## References

- Alkafeef, S.F., Zaid, A.M., 2007. Review of and Outlook for Enhanced Oil Recovery Techniques in Kuwait Oil Reservoirs. International Petroleum Technology Conference, Dubai. doi:10.2523/11234—ms
- Beliveau, D., 2009. Waterflooding Viscous Oil Reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 12 (5): 689—701. doi:10.2118/113132—pa
- Cai, J.C., Yu, B.M., 2012. Advances in Studies of Spontaneous Imbibition in Porous Media. *Advances in Mechanics*, 42 (6): 735—754 (in Chinese with English abstract).
- Doorwar, S., Mohanty, K.K., 2011. Viscous Fingering during Non-Thermal Heavy Oil Recovery. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver. doi: 10.2118/146841—ms
- Favero, J.L., Secchi, A.R., Cardozo, N.S.M., et al., 2010. Viscoelastic Flow Analysis Using the Software OpenFOAM and Differential Constitutive Equations. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 165 (23—24): 1625—1636. doi:10.1016/j.jnnfm.2010.08.010
- Gao, P.Q., Towler, B., 2011. Investigation of Polymer and Surfactant-Polymer Injections in South Slattery Minnelusa Reservoir, Wyoming. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 1 (1): 23—31. doi:10.1007/s13202—010—0002—2
- Jones, W.M., 1980. Polymer Additives in Reservoir Flooding for Oil Recovery: Shear Thinning or Shear Thickening? *Journal of Physics D: Applied Physics*, 13 (5): L87—L88. doi:10.1088/0022—3727/13/5/004
- Lake, L., Schmidt, R., Venuto, P., 1992. A Niche for Enhanced Oil Recovery in the 1900s. *Oilfield Review*, 4 (1): 55—61.
- Liu, X.L., Duan, M.L., Gao, P., et al., 2015. Development of Numerical Wave Flumes Based on OpenFOAM. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 54 (3): 373—378 (in Chinese with English abstract).
- Maerker, J.M., 1975. Shear Degradation of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide Solutions. *SPE Journal*, 15 (4): 311—322. doi:10.2118/5101—pa
- Maerker, J.M., Sinton, S.W., 1986. Rheology Resulting from Shear-Induced Structure in Associating Polymer Solutions. *Journal of Rheology*, 30 (1): 77—99. doi: 10.1122/1.549898
- Meyer, R.F., Attanasi, E.D., 2003. Heavy Oil and Natural Bitumen-Strategic Petroleum Resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(23): 12331—6.
- Schroeder, C.M., Babcock, H.P., Shaqfeh, E.S., et al., 2003. Observation of Polymer Conformation Hysteresis in Extensional Flow. *Science*, 301(5639): 1515—1519. doi: 10.1126/science.1086070
- Seright, R.S., Fan, T.G., Wavrik, K.E., et al., 2011. New Insights into Polymer Rheology in Porous Media. *SPE Journal*, 16(1): 35—42. doi:10.2118/129200—pa
- Sheng, J.J., Leonhardt, B., Azri, N., 2015. Status of Polymer-Flooding Technology. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 54(2): 116—126. doi:10.2118/174541—pa
- Su, Y.H., 2009. Study on Economic and Technical Limits of Heavy Oil Steam Huff and Puff in Shengli Oilfield (Dissertation). China University of Petroleum, Dongying (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.M., Cheng, J.C., Xia, H.F., et al., 2002. Improvement of Displacement Efficiency of Cores by Driving Forces Parallel to the Oil-Water Interface of Viscous-Elastic Fluid. *Acta Petrolei Sinica*, 23 (5): 47—52 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.M., Cheng, J.C., Yang, Q.Y., 2000. Viscous-Elastic Polymer Can Increase Micro-Scale Displacement Efficiency in Cores. *Acta Petrolei Sinica*, 21(5): 45—51 (in Chinese with English abstract).
- Xia, H.F., Wang, D.M., Liu, Z.C., et al., 2001. Study on the Mechanism of Polymer Solution with Visco-Elastic Behavior Increasing Microscopic Oil Displacement Efficiency. *Acta Petrolei Sinica*, 22(4): 60—65 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y., 2014. The Microcosmic Mechanism of Viscoelastic Polymer Flooding Heavy Oil (Dissertation). Northeastern Petroleum University, Daqing (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q.Q., 2013. Research on Adaptable from Flooding and Profile Control in Bohai SZ36-1 (Dissertation). China University of Petroleum, Dongying (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.F., Wang, C.C., Yao, J., et al., 2016. A New Method for Microscopic Pore Structure Analysis in Shale Matrix. *Earth Science*, 41(6): 1067—1073 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H.J., Jiang, H.M., Su, Y.C., et al., 2009. Flow Behavior of Viscoelastic Polymer Solution in the Expansion Channel. *Acta Polymerica Sinica*, 1(6): 520—524 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H.J., Wang, D.M., Zhong, H.Y., et al., 2012. Flow Characteristics of Viscoelastic Polymer Solution in Micro-Pores. SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia,



Muscat,doi:10.2118/154640-ms

Yue,X.A.,Zhang,L.J.,Liu,Z.C.,et al.,2002.Viscoelastic Flow and Microscopic Displacement Mechanism of Polymer Solution in Reservoir Pores.*Oil & Gas Recovery Technology*, 9(3):4-6 (in Chinese with English abstract).

Zheng,Y.F.,Chen,R.X.,Xu,Z.,et al.,2016.The Transport of Water in Subduction Zones.*Science China: Earth Sciences*,59(4):651-681,doi:10.1007/s11430-015-5258-4

Zhong,H.Y.,Tian,Z.,Yin,H.J.,2012.Flow of Viscoelastic Polymer Solutions through a Planar Contraction with a Boundary Layer Effect.*Chemistry and Technology of Fuels and Oils*,48(5):393-402,doi:10.1007/s10553-012-0386-4

Zhou,S.W.,2009.Exploration and Practice of Offshore Oilfield Effective Development Technology.*Engineering Science*,11(10):55-60 (in Chinese with English abstract).

Zhou,W.,Zhang,J.,Feng,G.Z.,et al.,2008.Key Technologies of Polymer Flooding in Offshore Oilfield of Bohai Bay.SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition,Perth,doi:10.2118/115240-ms

#### 附中文参考文献

蔡建超,郁伯铭,2012.多孔介质自发渗吸研究进展.力学进

展,42(6):735-754.

刘秀丽,段梦兰,高攀,等,2015.基于 OpenFOAM 的数值波浪水槽研究.复旦学报(自然科学版),54(3):373-378.

苏映宏,2009.胜利油田稠油蒸汽吞吐开发经济技术界限研究(硕士学位论文).东营:中国石油大学.

王德民,程杰成,夏惠芬,等,2002.粘弹性流体平行于界面的力可以提高驱油效率.石油学报,23(5):47-52.

王德民,程杰成,杨清彦,2000.粘弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率.石油学报,21(5):45-51.

夏惠芬,王德民,刘中春,等,2001.粘弹性聚合物溶液提高微观驱油效率的机理研究.石油学报,22(4):60-65.

谢毅,2014.黏弹性聚合物驱稠油微观机理研究(硕士学位论文).大庆:东北石油大学.

许青青,2013.渤海 SZ36-1 油田泡沫调驱适应性研究(硕士学位论文).东营:中国石油大学.

杨永飞,王晨晨,姚军,等,2016.页岩基质微观孔隙结构分析新方法.地球科学,41(6):1067-1073.

尹洪军,姜海梅,苏宇驰,等,2009.黏弹性聚合物溶液在突扩孔道内的流动特性.高分子学报,1(6):520-524.

岳湘安,张立娟,刘中春,等,2002.聚合物溶液在油藏孔隙中的流动及微观驱油机理.油气地质与采收率,9(3):4-6.

周守为,2009.海上油田高效开发技术探索与实践.中国工程科学,11(10):55-60.