

黏弹性聚合物溶液在突扩孔道内的流动特性*

尹洪军^{1**} 姜海梅¹ 苏宇驰² 钟会影¹

(¹大庆石油学院提高油气采收率教育部重点实验室 大庆 163318) (²中海油田服务股份有限公司 北京 101149)

摘 要 采用上随体 Maxwell 本构方程,描述油藏条件下以第一法向应力差为主要特征的聚合物溶液的流变性.利用有限体积法对黏弹性聚合物溶液在突扩孔道内的流动特征进行数值模拟.绘制了流函数和速度的等值线图.研究了黏弹性的变化对微观波及效率的影响.数值模拟结果表明,聚合物溶液的黏弹性是影响波及效率的主要因素.凹角处的流动区域随着弹性的增加在不断增大,因此滞留区域不断减小,微观波及效率不断增大.具有黏弹特性的聚合物溶液相比于纯黏性的牛顿流体更利于提高驱油效率.这一结论有助于驱油工业上聚合物溶液的设计和优选.

关键词 上随体 Maxwell 流体,有限体积法,聚合物溶液,黏弹性,波及效率

在水驱油过程中,多孔介质中的残余油一般难以被驱替出来,而聚合物溶液驱替效果却较好.很多研究者通过实验研究证实,黏弹性聚合物溶液能够提高微观驱油效率^[1-3].黄延章等^[4]在微观驱油实验中观察到聚合物溶液驱替残余油的现象.王德民等^[3]通过比较水、甘油、聚丙烯酰胺溶液在 T 型流道中的驱替现象和结果,指出黏弹性聚合物溶液能够提高微观驱油效率,并通过对室内岩心驱替实验、微观驱油实验结果和油田生产数据的综合分析认为,黏弹性聚合物溶液通过在孔隙内的拉伸携带作用可在一定程度上驱替油藏孔隙表面的油膜、盲端及孔喉残余油.

在理论研究方面,近年来用数值模拟的方法来描述聚合物溶液的流动特性得到了高度重视.李险峰等^[5]采用拉格朗日-欧拉方法模拟了高分子复杂流体的平面绕流. Phan-Thien^[6]等用有限体积法模拟了黏弹性流体在直管中的二次流动.但均未与油田生产实际相结合.岳湘安等^[7]以黏弹性聚合物溶液驱替盲端类的残余油为主题,采用有限差分数值方法开展了大量研究,分析了随着聚合物溶液黏弹性的增加,流函数、速度等值线以及应力等值线等的相应变化情况,从理论上验证了黏弹性对残余油的作用,对于理解和进一步认识聚合物驱油机理起到了重要作用.但由于有限差分法本身对于复杂孔隙介质在求解的稳定程度和精确程度方面的局限性,在研究中当聚合物

溶液的黏弹性达到一定值时,不免将出现数值计算发散的情况,使得研究结果中聚合物溶液的黏弹性值与实际聚合物溶液的黏弹性值存在较大差别.

本文利用有限体积法对黏弹性聚合物溶液在突扩孔道内的流动特征进行数值模拟,提高了计算精度和收敛性,使得研究结果中聚合物溶液的黏弹性值更接近于实际聚合物溶液.研究结果对于进一步深化认识和丰富聚合物驱油机理,指导油田聚合物驱油方法更大规模的应用,大幅度提高原油采收率具有重要价值.

1 对聚合物溶液流动问题的数学描述

由于聚合物溶液的黏弹性和油藏中残余油所在真实孔道形状的多样性,数值方法在计算中应用十分复杂.为了方便理论研究,这些微观孔隙往往需要进行简化处理,如简化成突扩对称模型、突缩对称模型和带有盲端的微观孔道模型等等^[8-12].许多数值研究集中在黏弹性流体通过突扩和突缩流道内的流动上,其中突扩模型是研究黏弹性流动的典型模型.本文就是研究黏弹性聚合物溶液在突扩流道内的流动问题.如图 1 所示,主流道的宽度与扩张段的宽度之比为 1:4,长度之比为 1:1.其中,凸角位置相当于微观孔隙中的死油区,是本文研究的重点位置.采用这种扩张模型,主要

* 2008-08-13 收稿,2008-10-31 修稿;国家自然科学基金重点项目(基金号 0634020)资助项目、国家重点基础研究发展计划(973 计划,项目号 2005CB221300)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(项目号 11521003)和黑龙江省研究生创新科研项目(项目号 YJSCX2008-047HLJ)资助; ** 通讯联系人, E-mail: yinhj7176@126.com

基于两点原因,一是可以比较准确地反映出死油区在孔隙中的存在方式,二是能够充分体现聚合物溶液由于孔隙截面突变而产生的黏弹效应。

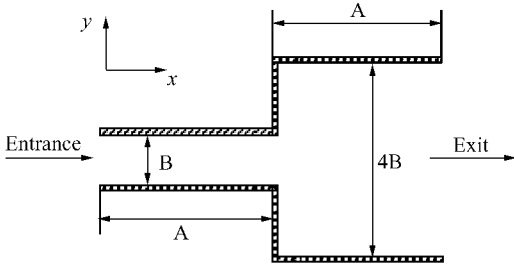


Fig. 1 The model of sudden expansion channel

在数学模型上采用了上随体 Maxwell(UCM)本构方程来描述油藏条件下以第一法向应力差为主要特征的聚合物溶液的流变性.该本构模型同时考虑了流体的黏性和弹性,能够反映聚合物溶液的基本流变特性.本文只研究黏弹性聚合物溶液在微观孔隙做等温的二维流动.其连续性方程、动量方程形式如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{V}$ 为速速矢量, p 为压力, $\boldsymbol{\tau}$ 为偏应力张量, ρ 为流体的密度.

上随体 Maxwell 的本构方程可写成如下形式:

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} = \mu \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (3)$$

式中 λ 为松弛时间, μ 为黏度, $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ 为变形速率张量.

引入无因次定义:

$$x_D = \frac{x}{h}, y_D = \frac{y}{h}, u_D = \frac{u}{U}, v_D = \frac{v}{U},$$

$$\tau_{D,ik} = \frac{h}{\eta U} \tau_{ik}, p_D = \frac{h}{\eta U} p$$

取主流道的宽度为特征长度 h , 其中截面的平均速度为特征速度 U , 定义 $T = \eta U / h$ 为特征应力, 雷诺数 Re 、威森博格数 We 分别用来表征流动过程中惯性和黏弹性的大小 ($Re = \rho U h / \eta$, $We = \lambda U / h$).

为了书写方便,将省去下脚标 D , 若无特殊说明,下文所涉及的压力、速度、应力等均为无因次量.控制方程无因次化后可得连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} (Re u u) + \frac{\partial}{\partial y} (Re u v) = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (Re u v) + \frac{\partial}{\partial y} (Re v v) = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (6)$$

本构方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (We u \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (We v \tau_{xx}) = \\ 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \left(1 - 2We \frac{\partial u}{\partial x}\right) \tau_{xx} + 2We \frac{\partial u}{\partial y} \tau_{xy} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (We u \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (We v \tau_{yy}) = \\ 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \left(1 - 2We \frac{\partial v}{\partial y}\right) \tau_{yy} + 2We \frac{\partial v}{\partial x} \tau_{xy} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (We u \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (We v \tau_{xy}) = \\ \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \tau_{xy} + We \frac{\partial v}{\partial x} \tau_{xx} + We \frac{\partial u}{\partial y} \tau_{yy} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 u, v 为 x 和 y 方向的速度分量, η 为零剪切黏度, T_{xx}, T_{yy} 为法向应力, T_{xy} 为剪切应力.

给定边界条件,用流体力学控制方程和本构方程能够组成封闭的方程组来描述聚合物溶液的流动行为,有限体积法在求解时,其具体的网格生成原理和离散格式在文献[13]中有详尽描述,其中 u, v, p 代数方程的分离式求解方法的关键是如何求解压力场,本文在求解过程中对给定的压力场作了改进,即进行了修正,具体原则及压力修正算法的基本步骤参见文献[14].

2 扩张流道中的流动特性

利用上述数值方法进行模拟计算,可得到不同 We 值下的流场和速度场,如图 2、图 3 所示.

2.1 扩张流道内的速度分布

图 2(a)~2(d)给出了黏弹性流体在扩张流道内流动时,在 Re 等于 10^{-5} , 不同 We 值情况下的速度等值线图.如果以 $V = 0.015625$ 作为流动边界,观察图中 $V = 0.015625$ 的速度等值线,可以发现,随着 We 的增加,该速度等值线略向凸角处移动.即随着黏弹效应的增加,其在凸角内的流动速度将会大大超过纯黏性流体 ($We = 0$ 即牛顿流体^[15]) 的流动速度.经过与文献[8]和文献[11]的比较,发现随着 We 的增加速度等值线图的变化规律具有一致性.

2.2 扩张流道内的流线形状

图 3 给出了黏弹性流体在扩张流道内流动

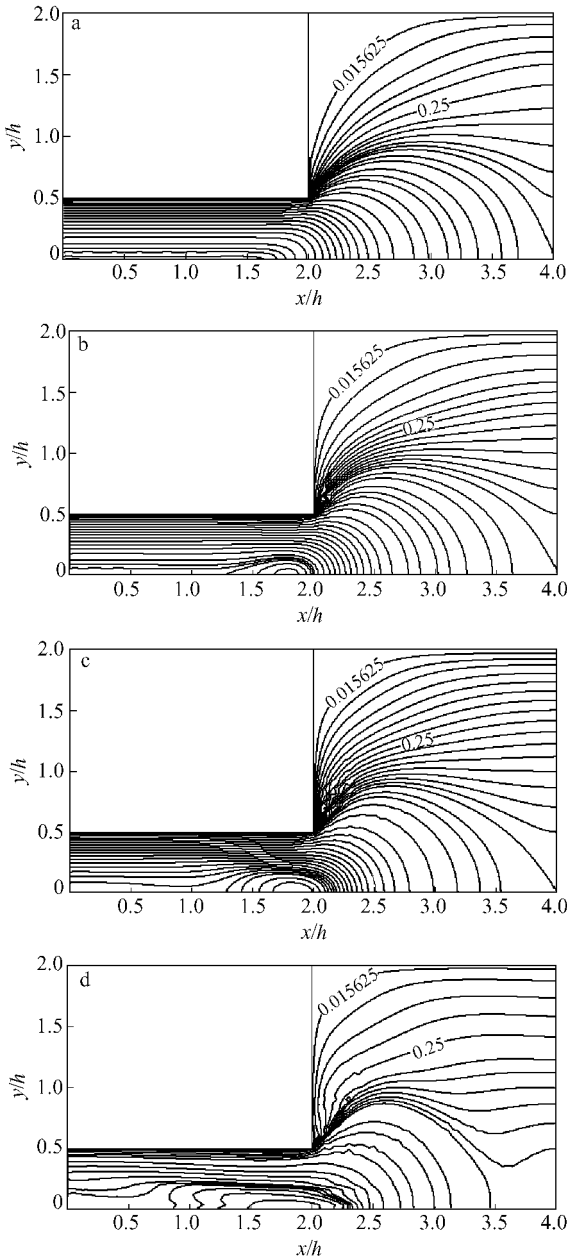


Fig. 2 Velocity contours

a) $We = 0$, $Re = 10^{-5}$; b) $We = 0.6$, $Re = 10^{-5}$; c) $We = 1.2$, $Re = 10^{-5}$; d) $We = 3.2$, $Re = 10^{-5}$

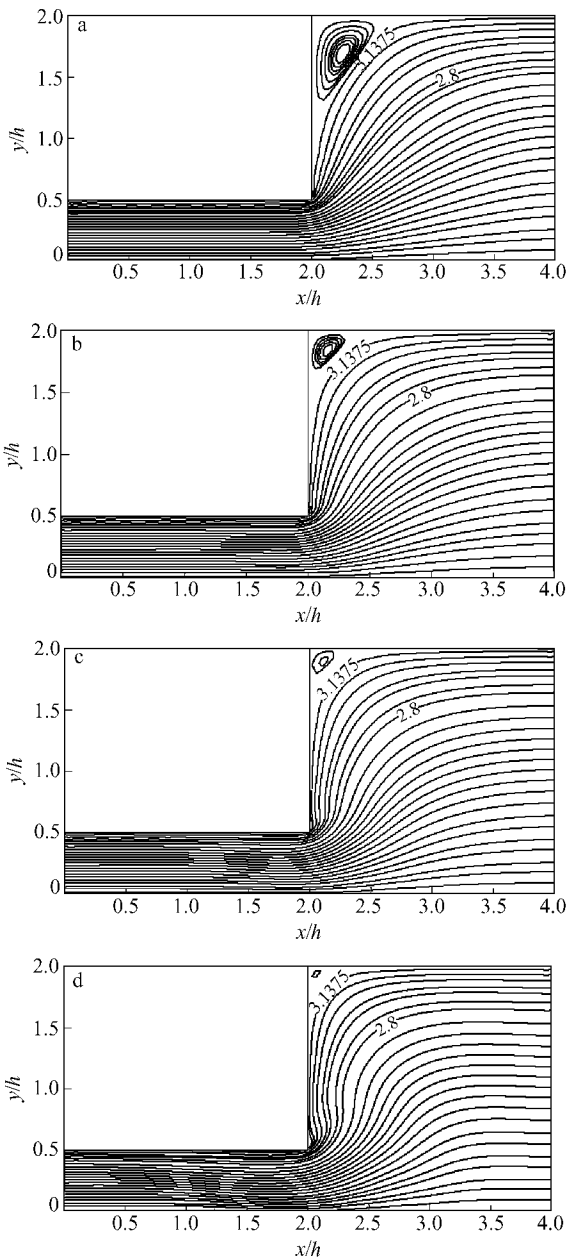


Fig. 3 Stream function contours

a) $We = 0$, $Re = 10^{-5}$; b) $We = 0.6$, $Re = 10^{-5}$; c) $We = 1.2$, $Re = 10^{-5}$; d) $We = 3.2$, $Re = 10^{-5}$

时,在 Re 等于 10^{-5} ,不同 We 值情况下的流函数等值线.从图中可以发现,无论是黏性流还是弹性流,在凸角处都存在涡流.很显然,在突扩流道内,流体的黏弹性导致了涡流区域的范围和密度不断减小.产生此现象的原因是,当流体进入一个相对较宽的流道时,它将会试图沿着流线松弛其对应的应力.对于不可压缩的黏弹性流体而言,将会导致流线在横向流动方向上的扩张.这一特性与发生在突缩流道中^[11]的恰恰相反,在突缩流道中,流体通过增加涡流区域的密度和范围来松弛其对

应的应力.

3 微观波及效率

3.1 波及边界的定义

驱替液在孔隙流道截面突变处的流动主要取决于涡流强度,要确定波及效率,首先应该确定涡流区域的大小.这类涡流区域由一个或几个满足特低动力学条件的封闭曲面构成,将其定义为驱替液波及边界.通过分析波及边界上的速度分布,就可以较为准确地描述和模拟出黏弹性流体在驱

替原油过程中平衡时的状态,从而计算出稳态时的波及效率.

如前所述,观察图 2,可以发现, $V = 0.015625$ 的速度等值线向凸角移动.如果我们假定在油藏条件下, $V < 0.015625$ 时,流体可视为不流动,那么,规定该等速线向流道宽度方向延展后所确定的波及面即为驱替液波及边界.为了观察的直观性,以速度等值线为 $V = 0.015625$ 为基准,在图 4 中将各种情况的这条等值线画到一个模型中.

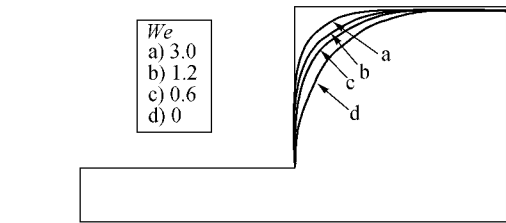


Fig. 4 The flow boundary moves as the We increases

从这些 $V = 0.015625$ 的速度等值线图中,能够明显的观察到,当 Re 一定时,随着 We 的增加这条等值线逐渐向凸角中延伸,波及面积随之增大.

3.2 微观波及效率的计算

微观波及效率 η 为确定波及边界的等速线与孔道的上壁延长线所围成的面积 A_1 与凹角以上孔道总面积 $A_1 + A_2$ 的比值,如图 5 所示.微观波及效率可表示为:

$$\eta = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \tag{10}$$

Fig. 5 The sketch of calculating the micro-sweep efficiency

通过上述方法可以得到速度法确定的凹角死

油区内原油波及效率随 We 的变化图,如图 6 所示.由图 6 可知,当 Re 很小时,即在油藏流动条件,流体的黏弹效应对提高驱替液的微观波及效率起着重要的作用,黏弹效应越大,其贡献越大,即微观波及效率越高.

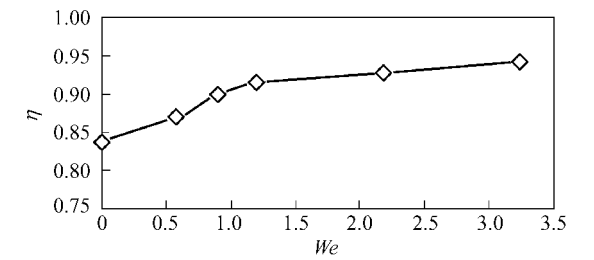


Fig. 6 The curve of micro-sweep efficiency ($Re = 10^{-5}$)

4 结论

采用有限体积法研究了 UCM 流体通过 4:1 的突扩模型的流动.该数值算法提高了计算精度和收敛性,使表征黏弹性的参数 We 值可算至 3.2,超过了以往使用有限差分法进行数值模拟时 We 一般小于 0.5 的情况^[8~12],表明该算法更适用于分析黏弹性较强的聚合物溶液的流动特性.

本文模拟的是 UCM 流体在突扩模型中的流动,该方法同样可以扩展到更多的本构方程中,例如 Phan-Thien-Tanner 模型和 Oldroyd-B 模型,以及聚合物溶液在油藏流动过程中遇到的其它多孔介质简化模型,如文献[16]中,李险峰用拉格朗日-欧拉方法模拟的高分子复杂流体的平面收缩流动.

数值模拟的结果显示,聚合物溶液的黏弹性是影响驱替效率的主要因素,随着黏弹性的增加,在凹角处的流体波及范围明显的增大,因此凹角处的非流动区域即死油区的范围减小.相对于牛顿流体,聚合物溶液的流动速度也在变大,进一步证实了微观波及效率随着弹性的增加而不断提高.在定性上与文献[3]所做的实验结果相一致.因此具有黏弹特性的聚合物溶液相对于牛顿流体能够更好的驱替残余油,提高驱替效率.

REFERENCES

- 1 Zhang Hongfang(张宏方), Wang Demin(王德民), Yue Xiangnan(岳湘安), Wang Lijun(王立军). Acta Polymeric Sinica(高分子学报), 2003, (3): 321 ~ 325
- 2 Wang D M, Cheng J C, Xia H F. SPE 72123, 2001, 1: 157 ~ 164
- 3 Wang Demin(王德民), Cheng Jiecheng(程杰成), Yang Qingyan(杨清彦). Acta Petrolei Sinica(石油学报), 2000, 21(5): 45 ~ 51
- 4 Huang Yanzhang(黄延章), Yu Dasen(于大森). Microscopic Seepage Experimental Mechanics and its Application(微观渗流实验力学及其应用). Beijing(北京): Petroleum Industry Press(石油工业出版社). 2001. 22 ~ 40
- 5 Li Xianfeng(李险峰), Yuan Xuefeng(袁学锋), Bu Huaitian(步怀天), Zhao Delu(赵得禄). Acta Polymeric Sinica(高分子学报), 2000, (5): 521 ~ 525
- 6 Xue S C, Phan-Thien N, Tanner R I. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1995, 59: 191 ~ 213
- 7 Zhang Lijuan(张立娟), Yue Xiangnan(岳湘安). Journal of Hydrodynamics, Ser A(水动力学研究与进展), 2002, 17(6): 748 ~ 755
- 8 Yin H J, Wang D M, Zhong H Y. SPE 101950, 2006, 2: 786 ~ 795
- 9 Yin H J, Zhong H Y, Fu C Q. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2007, 19(2): 210 ~ 216
- 10 Zhang Lijuan(张立娟), Yue Xiangnan(岳湘安). Petroleum Exploration and Development(石油勘探与开发), 2004, 31(5): 105 ~ 108
- 11 Yin Hongjun(尹洪军), Jiang Haimei(姜海梅), Zhong Huiying(钟会影), Su Yuchi(苏宇驰). Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing(大庆石油地质与开发), 2008, 27(2): 56 ~ 59
- 12 Yin Hongjun(尹洪军), Zhong Huiying(钟会影), Wang Hongtao(王洪涛). Special Oil & Gas Reservoirs(特种油气藏), 2005, 12(4): 36 ~ 39
- 13 Patankar S V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere. 1980. 77 ~ 82
- 14 Aboubacar M, Philips T N, Tamaddon-Jahromi H R, Snigerev B A, Webster M F. J Comput Phy, 2004, 199: 16 ~ 40
- 15 Li Xianfeng(李险峰), Zhao Delu(赵得禄). Acta Polymeric Sinica(高分子学报), 2000, (3): 280 ~ 286
- 16 Li Xianfeng(李险峰), Yuan Xuefeng(袁学锋), Bu Huaitian(步怀天), Zhao Delu(赵得禄). Acta Polymeric Sinica(高分子学报), 2000, (4): 432 ~ 437

FLOW BEHAVIOR OF VISCOELASTIC POLYMER SOLUTION IN THE EXPANSION CHANNEL

YIN Hongjun¹, JIANG Haimei¹, SU Yuchi², ZHONG Huiying¹

(¹ Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery, Ministry of Education, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318)

(² China Oilfield Services Limited, Beijing 101149)

Abstract The upper-convected Maxwell (UCM) model was used to describe the rheological properties of polymers. A finite volume method (FVM) for the numerical solution of viscoelastic flows through an abrupt expansion channel is presented. Although there have been many successful numerical predictions of elastic fluid flows, the Weissenberg number (We) which stands for the elastic is low. With the FVM, stable solutions are found for high Weissenberg number (the elasticity levels up to $We = 3.2$), further extending the range of previous similar simulations. The simulations reinforce the point that the FVM can be used as a viable alternative for the solution of viscoelastic problems. Through the results of numerical simulations, the contours of velocity and stream function are drawn and micro-scale sweep efficiency is calculated quantitatively. Numerical results show that the viscoelasticity of polymer solutions is the main factor influencing the sweep efficiency. With increasing elasticity, the flowing area in the dead end is enlarged significantly, thus the area with immobile zones becomes smaller, the microcosmic sweep efficiency increases. The visco-elastic nature of the displacing polymer fluids can in general improve the displacement efficiency in pores compared to using Newtonian fluids. This conclusion should be useful in selecting polymer fluids and designing polymer flooding operations.

Keywords UCM fluid, Finite volume method (FVM), Polymer solution, Viscoelasticity, Sweep efficiency