

文章编号:1673-5005(2011)05-0134-05

聚合物黏弹性提高驱油效率研究

吴文祥, 王德民

(东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:通过室内物理模拟实验,在弱亲油人造物理模型上研究第一法向应力差 N_1 (弹性)、第一法向应力差斜率 S_{N_1} (弹性)和威森博格数 We (弹性)对驱油效率和残余油饱和度的影响。在弱亲油的人造物理模型上研究相同黏度条件下甘油与聚丙烯酰胺 (HPAM) 的驱油效率,在此基础上,在大庆油田开展两个高浓度聚合物矿场试验。结果表明:随着第一法向应力差、第一法向应力差斜率和威森博格数的增加,驱油效率增加,残余油饱和度降低;具有弹性的聚合物溶液,驱油效率明显高于相同黏度下的甘油;高浓度聚合物所具有的高黏弹性使采收率有较大幅度提高。

关键词:黏弹性; 第一法向应力差; 第一法向应力差斜率; 威森伯格数; 驱油效率; 残余油饱和度; 矿场试验

中图分类号:TE 357. 46 **文献标志码:**A doi:10. 3969/j. issn. 1673-5005. 2011. 05. 025

Research on improving oil displacement efficiency using viscoelastic behavior of polymer

WU Wen-xiang, WANG De-min

(College of Petroleum Engineering in Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Some physical simulation experiments were conducted. The effects of the first normal stress difference N_1 , the slope of the first normal stress difference S_{N_1} and Wesson Borg number on oil displacement efficiency and residual oil saturation based on slightly oleophilic artificial physical model were studied. Under the same viscosity conditions, the oil displacement efficiency was investigated. Two high-concentration polymer flooding field tests were carried out in Daqing Oilfield. The results demonstrate that with the increase of the first normal stress difference, the slope of the first normal stress difference and Wesson Borg number, the oil displacement efficiency increases and residual oil saturation decreases. Under the same viscosity conditions, the oil displacement efficiency of polymer flooding was higher than that of the glycerol flooding significantly because of the elasticity of polymer. The oil recovery efficiency is greatly improved because of high viscoelastic behavior of high concentration polymer.

Key words: viscoelasticity; the first normal stress difference; slope of the first normal stress difference; Wesson Borg number; oil displacement efficiency; residual oil saturation; field test

大庆油田自 1996 年实施聚合物驱工业化推广应用以来,规模不断扩大。常规聚合物驱使大庆油田石油采收率提高了约 10%^[1]。然而,目前大庆油田一类油层常规聚合物驱已经接近尾声^[2-3]。有学者认为常规聚合物驱所采用的聚合物溶液及注入条件下,聚丙烯酰胺 (HPAM) 溶液黏弹效应可以忽略^[4],但王德民等^[3]根据岩心实验结果,认

为具有黏弹性的聚合物溶液可以通过黏弹性流体的“拉、拽”作用提高驱油效率,降低残余油饱和度。联邦德国 Push 教授发现 HPAM 的驱油效率高是其具有黏弹性的缘故。有研究指出聚驱提高驱油效率是毛管数提高之故^[5]。笔者从聚合物溶液的弹性出发,通过对聚合物弹性及其驱油效率的研究,进一步考察聚合物弹性对驱油效率的影

收稿日期:2011-05-09

基金项目:“973”国家重点基础研究发展计划项目(2005CB221300)

作者简介:吴文祥(1961-),男(汉族),吉林扶余人,教授,博士生导师,研究方向为化学法提高采收率。

响,再通过矿场试验来验证弹性对高浓度聚合物提高驱油效率的作用。

1 弹性对驱油效率和残余油饱和度的影响实验

1.1 实验材料

聚合物:部分水解聚丙烯酰胺,相对分子质量分别为 1.3×10^7 、 1.9×10^7 、 2.3×10^7 ;水:人工合成盐水,饱和模型用水矿化度为 6.778 g/L ,配制聚合物用水矿化度为 0.508 g/L ;油:大庆油田采油一厂原油与煤油配制的模拟油,其黏度在 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下为 $9.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$;岩心:石英砂环氧胶结的人造均质岩心 ($\Phi 2.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 和 $4.5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$),岩心呈弱亲油性,油润湿指数为 0.64 ,水润湿指数为 0.4 。

1.2 实验设备

流变仪:德国 HAKKE 公司制造的 RS-150 流变仪;驱油设备:恒温箱,岩心夹持器,电动高压计量泵,手动高压计量泵,真空泵,压力传感器等。

1.3 驱油实验步骤

- (1)将模型装在岩心夹持器中,抽空 3 h 后饱和人工合成盐水 (6.778 g/L),测量孔隙度;
- (2)将饱和好人工合成盐水的模型放置在恒温箱内恒温 12 h 以上 ($45 \text{ }^\circ\text{C}$),水测渗透率;
- (3)油驱水至模型出口不出水为止,确定原始含油饱和度;
- (4)使用不同黏弹性溶液,一般情况下按照 1 m/d 的驱替速度连续驱替 $30 V_p$ (V_p 为孔隙体积);
- (5)确定最终驱油效率及残余油饱和度。

1.4 实验结果分析

根据毛管数的定义: $N_c = \frac{\mu u}{\sigma}$ 。其中, u 为驱替速度, m/s ; μ 为驱油体系黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; σ 为界面张力, mN/m 。

当以固定速度 u 进行驱替时,通过调整体系界面张力^[7],使 μ/σ 比值保持不变,可使毛管数保持不变。当毛管数一定时,黏度对体系驱油效率和残余油饱和度的影响已经考虑进去,即认为弹性成为体系驱油效率和残余油饱和度的主要影响因素,在这种条件下,来研究弹性对驱油效率和残余油饱和度的影响规律。

(1)第一法相应力差 N_1 ^[6]。图 1 所示为在弱亲油均质人造岩心中,相对分子质量为 1.8×10^7 的聚丙烯酰胺溶液的黏弹性及毛管数对驱油效率的影

响^[7]。

实验以第一法向应力差 N_1 (它表示主应力与其垂直方向上应力的差值)表示不同质量浓度溶液的弹性。从图 1 中可以看出,在毛管数一定的条件下,随着第一法向应力差的增加,驱油效率增加、残余油饱和度降低。

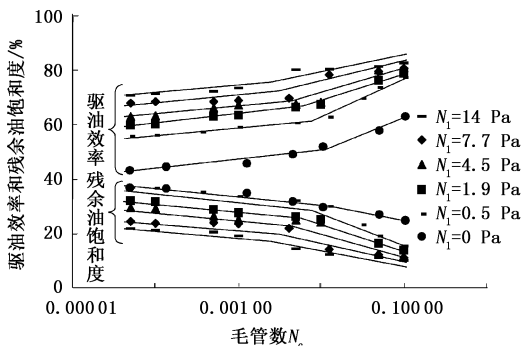


图 1 HPAM 黏弹性及毛管数对驱油效率 D_e 及残余油饱和度 S_{or} 的影响

Fig. 1 Influence of viscoelasticity and capillary number of HPAM solutions on D_e , S_{or}

第一法相应力差越大,弹性越高,在高弹性条件下,由于溶液产生的微观力增加(即“可变直径活塞”作用更强),剩余油可以在比较低的毛管数(也就是比较低的驱动力与滞留力之比)条件下移动和富集。因此,聚合物溶液的弹性是影响其提高驱油效率、降低残余油饱和度的重要因素。

(2)第一法向应力差斜 S_{N_1} 。利用 RS-150 流变仪测定的多种聚合物溶液 N_1 随剪切速率 γ 的变化规律显示,在一定的剪切速率范围内 ($0 \sim 1500 \text{ s}^{-1}$),随着剪切速率的增加,第一法向应力差增加,其增加的规律呈线性关系^[8],因此还可以用第一法向应力差随剪切速率变化趋势的斜率 S_{N_1} 表示弹性。 S_{N_1} 可以反映驱替液的弹性,且斜率本身为无量纲数,便于不同聚合物溶液的对比。利用该斜率表征驱替液的弹性不会给聚合物驱提高驱油效率机制的理解带来歧义。

不同的 S_{N_1} 代表不同聚合物的弹性。下面使用相对分子质量为 2.3×10^7 聚丙烯酰胺,在不同质量浓度时做驱油实验。聚丙烯酰胺质量浓度分别为 0.50 、 1.50 、 2.50 g/L 时, S_{N_1} 分别为 0.84 、 2.24 、 3.21 。可以看出,聚合物溶液质量浓度越高, S_{N_1} 值越大,而聚合物质量浓度越高,也表明聚合物溶液具有的弹性越大,因此 S_{N_1} 值越大,弹性越大。

图 2 中给出的是不同 S_{N_1} 值下,HPAM 弹性及毛管数对驱油效率和残余油饱和度的影响。从图中可

以看出,在毛管数一定的情况下,随着 S_{N_1} 值(弹性)的增加,驱油效率逐渐增加,残余油饱和度逐渐降低。由此可知,弹性的增加能提高驱油效率、降低残余油饱和度。

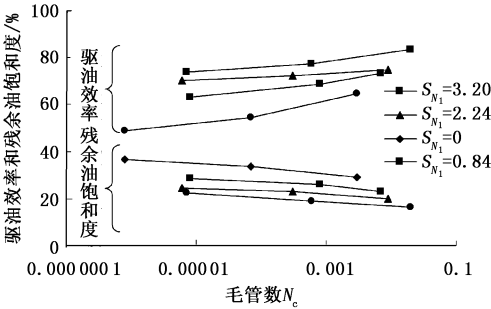


图2 HPAM 黏弹性及毛管数对驱油效率及残余油饱和度的影响

Fig.2 Influence of viscoelasticity and capillary number on displacement efficiency and residual oil saturation

(3)威森伯格数 We 。威森伯格 (Weissenberg) 数定义为第一法向应力差与切应力的比值^[9]: $We = N_1 / (2\tau)$ 。式中法向应力差 N_1 为弹性量,切应力 τ 为黏性量,因此威森伯格数 We 反映了溶液弹性的相对值^[10-13]。实验结果(剪切速率为 8.115 s^{-1})^[11]表明,当聚合物质量浓度分别为 0.50、1.00、1.50、2.00、2.50 g/L 时,其黏度分别为 12.5、41.5、65.3、126.9、191.9 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,对应的威森伯格数分别为 0.88、1.10、1.87、2.20、2.64。

可以看出聚合物质量浓度对威森伯格数的影响规律:在相同的剪切速率下,聚合物溶液质量浓度越高,威森伯格数越大,聚合物的弹性越大。由此可知,聚合物的弹性随着聚合物浓度的增加而增加。

在毛管数为 0.1 的条件下,进行了不同质量浓度聚合物体系驱油效率实验,结果见图 3。

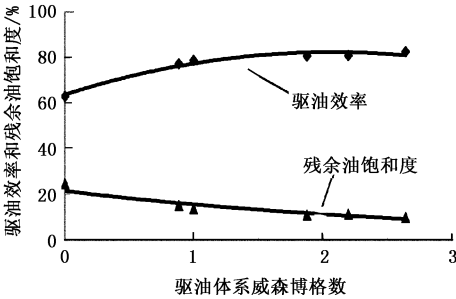


图3 驱油体系威森伯格数与驱油效率,残余油饱和度关系曲线

Fig.3 Relation curves between We and D_e , S_{or}

从图 3 中可以看出,随着威森伯格数(弹性)的增加,聚合物体系的驱油效率增加,残余油饱和度降

低。

聚合物溶液质量浓度越高,体系的黏弹性越大,同时,威森伯格数也越高。当驱替液威森伯格数由 0 增加到 2.64 时,即相当于聚合物质量浓度从 0 增加到 2.50 g/L,其驱油效率由 63.0% 增加到 82.6%,残余油饱和度由 24.7% 下降到 9.9%。由此可以看出,黏弹性越高,驱油效率越高,残余油饱和度越低。这也充分说明了聚合物体系的弹性在提高驱油效率、降低残余油饱和度中的重要作用。

从实验结果中可以看出,无论以第一法向应力差、第一法相应应力差斜率,还是以威森伯格数来表征弹性,都表明聚合物溶液弹性能够提高驱油效率,降低残余油饱和度。

2 HPAM 和甘油对比实验

为进一步验证具有黏弹性的聚合物溶液和无弹性的甘油溶液对驱油效率的影响,进行驱油物理模拟实验。

实验选用 4.5 cm×4.5 cm×30 cm 人造均质岩心,在岩心水驱出口端含水率 98% 后,注入 0.57 V_p 的甘油或 HPAM 溶液(黏度相同,相对分子质量为 1.3×10^7),后续水驱到岩心出口端含水率 98% 为止,计算出水驱采收率、最终采收率及采收率提高值,结果见表 1。

表1 HPAM 与甘油驱油效果对比结果

Table 1 Comparison of flooding effect between HPAM and glycerin

岩心号	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度 $\varphi/\%$	水驱采收率 $R_w/\%$	注剂	最终采收率 $R/\%$	采收率提高值 $\Delta R/\%$
1	1000	22.6	44.05	HPAM	54.55	10.50
2	993	21.4	45.54	甘油	51.69	6.15

通过甘油与 HPAM 驱油效率对比可以看出,在黏度相同的条件下,HPAM 的采收率提高值为 10.5%,而甘油的采收率提高值仅为 6.15%,聚合物溶液的驱油效率的绝对值比甘油高出 4.35%,相对值提高了 70.7%。很显然这是由于聚合物溶液具有高弹性引起的,由此可以看出,弹性能够提高驱油效率。

3 矿场试验

(1)大庆采油六厂。大庆采油六厂试验区含油面积为 1.67 km^2 ,地质储量 $355 \times 10^4 \text{ t}$,生产井数 35 口,投注井数 20 口。图 4 中给出的是截至 2010 年 6 月,大庆采油六厂高浓度聚合物矿场试验中含水率、

采收率、采出程度等与注入孔隙体积倍数的关系。

由图 4 可知,与水驱相比,高浓度聚合物采出程度达到了 26.01%,采收率达到了 21.12%,而含水率为 96.3%,随着含水率上升,采收率和采出程度还会进一步的增加。大庆从 1996 年开始工业性的注入普通聚合物溶液,平均提高采收率为原始石油地质储量的 13%,由此可以看出,高浓度聚合物与普通聚合物相比,采收率有大幅度提高。这一结果说明了试验区所用高浓度聚合物所具有的高黏弹性对驱油效率具有重要作用。

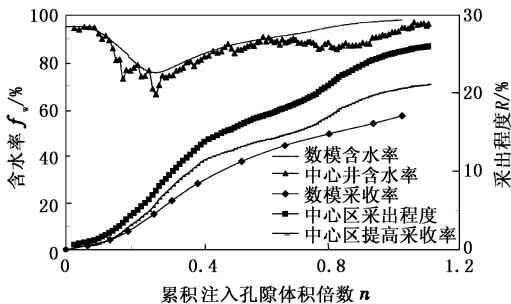


图 4 采油六厂含水率、采收率与注入 V_p 关系曲线

Fig. 4 Relation curves of water content Recovery ratio and V_p in No. 6 oil factory

从图中还可以看出,在整个聚合物驱过程中试验中心井含水率大部分都低于数模含水率,在整个聚合物驱过程中中心区采收率均高于数模采收率。

(2)大庆采油一厂。大庆采油一厂试验区含油面积为 1.87 km²,地质储量 473×10⁴t,生产井数 16 口,投注井数 9 口。图 5 给出的是截至 2010 年 6 月,大庆采油一厂高浓度聚合物矿场试验中含水率、采收率等与注入孔隙体积倍数的关系。

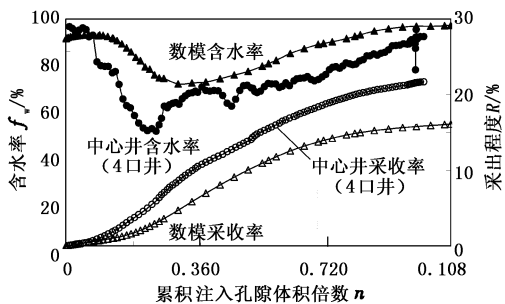


图 5 采油一厂含水率、采收率与注入 V_p 关系曲线

Fig. 5 Relation curves of F_w , R and V_p in No. 1 oil factory

由图 5 可知,截至 2010 年 6 月,中心井含水率为 94.6%,高浓度聚合物驱采收率达到了 21.69%。这主要是由于试验区所用高浓度聚合物比普通聚合物驱有更高的黏弹性,更有利于扩大波及体积和提高驱油效率,从而使采收率有较大提高。这也充分

说明了黏弹性对驱油效率的重要作用。

从图中还可以看出,在高浓度聚合物驱替过程中,中心井含水率均低于数模含水率,在整个聚合物驱过程中中心井采收率均高于数模采收率。

以上两个高浓度聚合物试验区仍然在进行后续水驱,采收率仍然在增加,高浓度聚合物驱在现场试验将会取得很好的驱油效果。

图 6 是两个高浓度聚合物驱与常规聚合物驱现场驱油效果对比。从图中可以看出,高浓度聚合物驱驱油效果均好于常规聚合物驱,两个高浓度聚合物驱采收率目前均已超过 21%,而常规聚合物驱采收率约为 12%。由此看出,高浓度聚合物所具有的高黏弹性对驱油效果有很大的贡献。

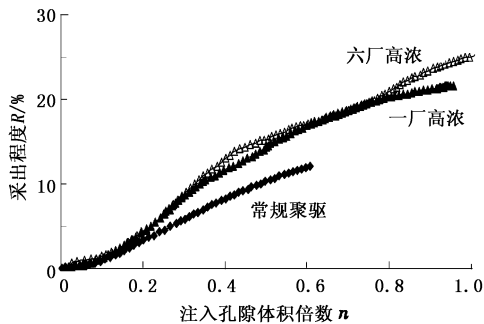


图 6 常规聚合物驱与高浓度聚合物驱驱油效果对比曲线

Fig. 6 Contrast curve of conventional polymer and high concentration polymer oil displacement effect

4 结 论

(1)随着第一方向应力差、第一方向应力差斜率和威森伯格数的增加,即随着弹性的增加,驱油效率增加,残油饱和度降低。

(2)HPAM 是具有黏度和弹性的高分子物质,HPAM 具有的弹性能够提高驱油效率。

(3)随着高浓度聚合物的注入,综合含水率下降,总采收率有较大幅度上升,现场试验充分验证了高黏弹性对驱油效率的重要作用。

参考文献:

- [1] 卢祥国,张云宝. 聚合物驱后进一步提高采收率方法及其作用机理研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(6):113-118.
LU Xiang-guo, ZHANG Yun-bao. EOR methods after polymer flooding and their action mechanisms[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(6):113-118.
- [2] 吴文祥,张玉丰. 聚合物及表面活性剂二元复合体系驱油物理模拟实验[J]. 大庆石油学报, 2005, 29(6):

- 98-100.
- WU Wen-xiang, ZHANG Yu-feng. Effect of pre-slug of Polymer/Surfactant upon the recovery efficiency of ASP compound flooding[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005,29(6):98-100.
- [3] 夏惠芬,王德民,刘中春. 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. Study on the mechanism of polymer solution with visco-elastic behavior increasing microscopic oil displacement efficiency[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001,22(4):60-65.
- [4] 张宏方,王德民,王立军. 聚合物溶液在多孔介质中的渗流规律及其提高驱油效率的机理[J]. 大庆石油地质与开发,2002,21(4):57-60.
- ZHANG Hong-fang, WANG De-min, WANG Li-jun. Flow laws of polymer solution in porous media and their mechanism on enhancing displacement efficiency[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002,21(4):57-60.
- [5] 王德民. 对大庆油田持续发展有影响的四项工艺技术与方法的探讨[J]. 大庆石油地质与开发,2002,21(1):10-19.
- WANG De-min. Four theories affecting the continuing development of Daqing Oilfield and the opinions on the problems of processing technology[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002,21(1):10-19.
- [6] WU Wenxiang, WANG Demin, JIANG Haifeng. Effect of the visco-elasticity of displacing fluids on the relationship of capillary number and displacement efficiency in weak oil-wet cores[R]. SPE 109228-MS, 2008.
- [7] 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):43-56.
- 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):43-56.
- [8] JIANG Haifeng, WU Wenxiang. The effect of elasticity on displacement efficiency in the lab and results of high concentration polymer flooding in the field proceedings [R]. SPE 115315-MS, 2008.
- [9] WANG Demin, CHENG Jiecheng, XIA Huifen, et al. Viscous-elastic fluids can mobilize oil remaining after water-flood by force parallel to the oil-water interface[R]. SPE 72123, 2001.
- [10] DE GENNES F G. Coil-stretch transition of dilute flexible polymers under ultrahigh velocity gradients[J]. J Chem Phys, 1974, 60:5030-5037.
- [11] 夏惠芬,张九然. 聚丙烯酰胺溶液的黏弹性及影响因素[J]. 东北石油大学学报,2011,35(1):46-50.
- XIA Hui-fen, ZHANG Jiu-ran. Viscoelasticity and factors of polymer solution[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2011,35(1):46-50.
- [12] BERGE L I, FEDER J, JOSSANG T. Rheology of particles in xanthan solutions flowing through a single pore [J]. Journal of Colloid and Interface Science,1990,133(1):295-297.
- [13] RODRIGUEZ S, ROMERO C, SARGENTI M L, et al. Flow of polymer solutions through porous media[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1993, 49: 63-85.
- (编辑 刘为清)