第 14 卷 第 1 期 2014 年 1 月
1671—1815(2014)01-0196-04

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 14 No. 1 Jan. 2014
© 2014 Sci. Tech. Engrg.

等黏度聚合物溶液对驱油效果影响研究

吴文祥 张 涛 母丽敏 邹积瑞

(东北石油大学石油工程学院, 大庆 163318)

摘 要 通过室内物理模拟实验,设计等黏度驱替实验中两种不同相对分子质量(1.9×10^7 和 2.5×10^7)聚合物溶液的黏度为 78.9 mPa·s(45 ℃下),对比了两者的黏弹性及其在等速注入和恒压注入下的驱油效果。实验结果表明,在等速注入和恒压注入,通过降低聚合物相对分子质量提高聚合物溶液浓度保持聚合物溶液黏度不变,低分子量高浓度方案化学驱采收率比高分子量低浓度方案提高近一个百分点;以等速方案最高压力恒定注入方案的化学驱采收率最高;在注入 PV 数相等时,相同黏度的两种不同聚合物交替注入驱方案驱油效果要优于这两种聚合物整体段塞驱方案。

关键词 聚合物驱油 等黏度 驱油效率

中图法分类号 TE357.461; **文献标志码** A

聚合物驱作为最有效的三次采油技术之一在大庆油田等各大油田得到了大规模的应用。聚合物驱油的主要机理是在水中加入高相对分子质量聚合物,增加了水相的黏度,降低水相渗透率,从而改善驱替相与被驱替相的流度比,有效地扩大波及体积,进而提高原油采收率[1,2]。在聚合物驱油过程中,影响聚合物驱油效果的因素很多,包括聚合物自身及其溶液性质,注入速度和注入水水质等几大类,不同因素对驱油效果的影响程度各不相同。本文通过非均质岩心驱油实验,在等速注入和恒压注入下研究了等黏度不同聚合物溶液及其组合段塞对驱油效果的影响。

1 实验

1.1 实验条件

实验设备:HD - Ⅲ综合驱油装置,Brookfield DV - Ⅱ型黏度计,ISCO 泵,JB - 3 型手动泵,平流泵,电子天平,磁力搅拌器以及中间容器等。

物理模型:石英砂环氧胶结的人造非均质岩心,几何尺寸为 4.5 cm×4.5 cm×30 cm,岩心包括高中低等厚的三个渗透层段,气测渗透率分别约为 800 md、500 md、300 md。

实验用聚合物:部分水解聚丙烯酰胺,相对分子质量分别为 1.9×10^7 和 2.5×10^7,固含量都为 90%。

实验用油:大庆油田某厂脱水原油与煤油混合配制的模拟油,在 45 ℃下,黏度为 10 mPa·s。

实验用水:人工合成盐水,饱和模型用水矿化度为 6 778 mg/L;配制聚合物母液用水矿化度为 508 mg/L;稀释聚合物母液及驱替模型用水矿化度为 3 700 mg/L。离子组成见表 1。

实验温度:均在 45 ℃条件进行。

表 1 实验用模拟盐水离子组成(mg/L)

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	矿化度
饱和水	2 183.2	10.5	23.1	66.2	2 363.5	77.1	2 054.4	6 778
驱替水	1 186.1	5.8	12.6	28.6	1 180.6	1 56.3	1 121.2	3 700
配聚用水	79.9	0	7.9	12.1	94.8	77.9	36.3	508

1.2 实验程序

(1)将浇铸好的模型抽真空 4 h 后,饱和矿化度为 6 778 mg/L 的模拟地层水,测量其孔隙度。

(2)将饱和好模拟地层水的模型放在恒温箱内恒温 12 h 以上(45 ℃)。

(3)油驱水直至模型出口不出水为止,计算原始含油饱和度。

(4)按规定的驱替速度水驱至模型出口含水

2013 年 7 月 8 日收到 国家重大科技专项(2011ZX05009—004)资助
第一作者简介:吴文祥(1961—),男,博士生导师。研究方向:三次采油化学驱。E-mail:sygcwwxiang@163.com。

表 2　聚合物驱油实验数据

方案号	渗透率/md	孔隙度/%	含油饱和度/%	采收率/%			方案(相对分子质量)
				水驱	聚驱	总采收率	
1-1	540	24.91	70.82	45.85	32.99	78.84	0.64 PV1 500 mg/L(2.5×10^7)
1-2	531	25.12	71.5	46.18	34.02	80.2	0.64 PV2 075 mg/L(1.9×10^7)
1-3	522	25.7	70.05	45.86	35.12	80.98	0.32 PV1 500 mg/L(2.5×10^7) + 0.32 PV2 075 mg/L(1.9×10^7)
2-1	549	25.22	71.74	45.92	34.78	80.7	0.64 PV1 500 mg/L(2.5×10^7)
2-2	549	25.04	70.46	46.05	35.84	81.89	0.64 PV2 075 mg/L(1.9×10^7)
3-1	514	25.3	71.84	45.54	33.48	79.02	0.64 PV1 500 mg/L(2.5×10^7)
3-2	522	24.46	70.46	46.22	34.52	80.74	0.64 PV2 075 mg/L(1.9×10^7)
3-3	526	25.28	70.14	45.65	35.48	81.13	0.32 PV1 500 mg/L(2.5×10^7) + 0.32 PV2 075 mg/L(1.9×10^7)

注:含油饱和度计算式:含油饱和度 = 岩心饱和油量/岩心孔隙体积;水驱采收率 = 水驱阶段产油量/岩心饱和油量;化学驱采收率 = 化学驱阶段产油量/岩心饱和油量;总采收率 = 总产油量/岩心饱和油量。

98% 以上,水驱油结束,计算水驱采收率。

(5)按照实验方案进行化学驱,注入量达到所规定的孔隙体积倍数(0.64 PV)。

(6)段塞全部注完后,继续水驱至出口含水 98% 以上,计算化学驱采收率。

1.3　实验方案及实验数据

表 2 给出的是聚合物用量及不同段塞组合对驱油效果影响的实验方案和实验数据。

2　结果与讨论

2.1　聚合物溶液黏度设计

等黏度驱替实验中聚合物溶液的黏度定为 78.9 mPa·s,即聚合物相对分子质量 2 500 万和相对分子质量 1 900 万在溶液中的浓度分别为 1 500 mg/L 和 2 075 mg/L,选用 Brookfield DV—Ⅱ型布什黏度计,在剪切速率 6 r/min,温度 45 ℃下测定各溶液的黏度。

表 3　两种不同聚合物溶液浓度设计

序号	相对分子质量	设计黏度/(mPa·s)	计算浓度/(mg·L^{-1})	实测黏度/(mPa·s)	实测黏度与设计黏度的差值/(mPa·s)
1	1.9×10^7	78.90	2075	78.96	0.06
2	2.5×10^7	78.90	1500	78.90	0

2.2　储能模量和损耗模量

根据黏弹性理论可知,损耗模量 G''反映了聚合物溶液形变过程中耗散的能量,反映了流体的黏性特性;储能模量 G'反映了聚合物溶液形变时所储存的能量,反映了流体的弹性特性。储能模量和损耗模量与角速度的关系见图 1。从图 1 中可以看出,在角速度相同的情况下,相对分子质量 1 900 万聚合物溶液的储能模量和损耗模量都稍高于相对分子质量 2 500 万聚合物溶液。对于同一种聚合物溶液,其储能模量和损耗模量曲线都有一个交点,当角频率低于该交点处的角频率时损耗模量大于储能模量,说明溶液的黏性效应大于弹性效应;反之,储能模量大于损耗模量,弹性效应为主[3]。这是因为当施加于溶液的角频率较小时,大分子线团有充足的时间改变构象,摆脱缠绕,缓慢和相互超越地流动,同时,聚合物分子链的弹性拉伸可在流动中逐渐恢复。因此,溶液的黏性占优势,弹性不明显。而角频率较大时,弹性变形能大部分储存在体系内部,黏性损耗的能量相对较少[4]。

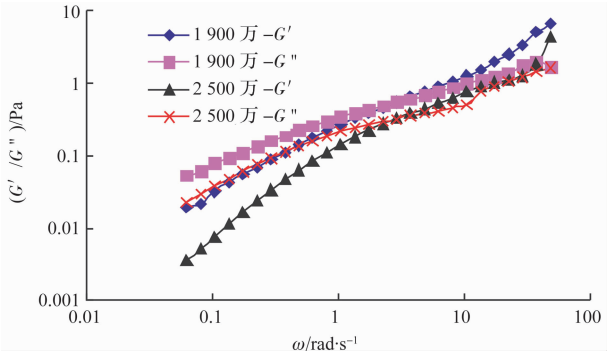

图 1　储能模量和损耗模量和角频率关系

2.3　等速注入等黏度不同聚合物溶液及其组合段塞对驱油效果影响

方案 1-1 ~ 1-3 三个方案以 1 m/d 恒速注入聚

合物溶液,从表2 和图2 可看出,方案1-1 ~1-3 化学驱采收率分别为 32.99% ,34.02% 和 35.12%。在段塞尺寸和聚合物溶液黏度相同的情况下:①等黏度的两种不同聚合物交替注入驱方案化学驱采收率要高于这两种聚合物整体段塞驱方案,即方案 1-3 的化学驱采收率比方案 1-1 和方案 1-2 分别高 2.13% 和 1.1%。这是由于先注入 2 500 万聚合物起到了较好的"调剖"作用,2 500 万聚合物相对分子质量大,分子半径也大。在聚合物注入过程中,首先进入比其分子半径大的高渗透层中产生较大的渗流阻力,有效封堵高渗透层,后期注入的 1 900 万聚合物时,其聚合物分子将进入高渗透层中较小的孔道,使得高渗透层渗透率进一步降低,并且可更有效地进入中、低渗透层,从而增强扩大波及体积的能力。②低分子量高浓度方案的化学驱采收率比高分子量低浓度方案的化学驱方案的高,即方案 1-2 的化学驱采收率比方案 1-1 的高 1.03%。这是由于高分子量聚合物分子长链和较长链段数多,在地层中更容易受到剪切降黏,所以驱油过程中黏度略低于低分子量高浓度的驱油方案;再者,低分子量聚合物溶液黏弹性高,孔吼中的残余油更可能被聚合物溶液"拽出",使残余油饱和度下降,提高洗油效率[5—8]。

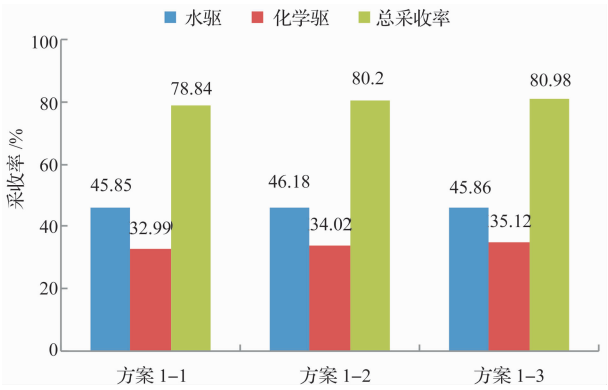

图 2 各方案采收率柱状图

2.4 恒压注入等黏度不同聚合物溶液及其组合段塞对驱油效果影响

方案 2-1 和 2-2 中,以方案 1-1 的最高压力(0.621 MPa)恒定注入聚合物溶液,进行两种等黏度不同聚合物整体段塞驱方案;方案 3-1 至 3-3 中,以方案 1-1 平均压力(0.367 MPa)恒定注入聚合物溶液,进行两种等黏度不同聚合物整体段塞驱方案及其组合段塞方案。

从表 2、图 3 和图 4 可以看出,方案 2-1 和 2-2 对应的化学驱采收率分别为 34.78% 和 35.84%。方案 3-1 ~ 3-3 对应的化学驱采收率分别为 33.48% 、34.52% 和 35.48%。在段塞尺寸和聚合物溶液黏度相同的情况下:①在聚合物溶液浓度相同的条件下,以等速方案 1-1 平均压力注入时,化学驱采收率与等速注入方案化学驱采收率基本一致。而以等速方案的最高压力注入时,采收率最大,即方案 3-1 的化学驱采收率比方案 1-1 的仅高 0.49%,方案 3-2 的化学驱采收率比方案 1-2 的仅高 0.5%,方案 3-3 的化学驱采收率比方案 1-3 的仅高 0.36%;而方案 2-1 的化学驱采收率比方案 3-1 的高 1.3%,方案 2-2 的化学驱采收率比方案 3-2 的高 1.32%,这是由于在保证注入压力低于地层破裂压力时,注入压力越大,扩大波及体积的能力越强,所以化学驱采收率越高。②在注入压力恒定的条件下,方案 3-1 和 3-2 的水驱采收率基本一致,化学驱采收率低分子量高浓度方案采出程度高,即方案 3-2 的化学驱采收率比方案 3-1 的高 1.04%;等黏度的两种不同聚合物交替注入驱方案化学驱采收率要高于这两种聚合物整体段塞驱方案,即方案 3-3 的化学驱采收率比方案 3-1 和方案 3-2 分别高 2% 和 0.96%。

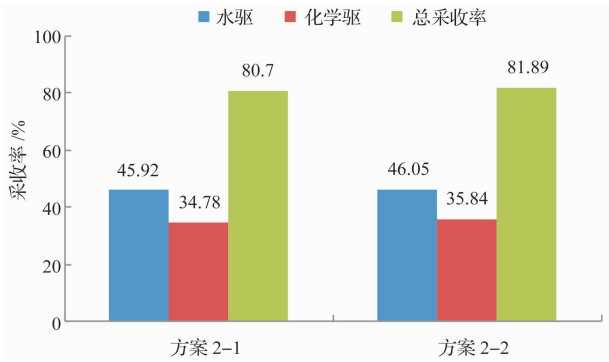

图 3 以 0.621 MPa 压力注入两种相同黏度聚合物采收率柱状图

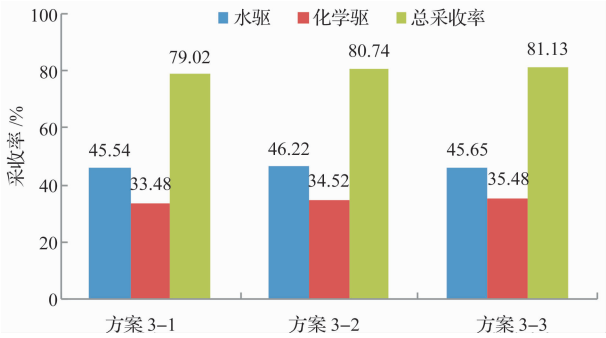

图 4　以 0.367 MPa 压力注入两种相同黏度聚合物采收率柱状图

3　结论

(1)不论是等速注入还是恒压注入,通过降低聚合物分子量提高聚合物溶液浓度保持聚合物溶液黏度不变,低分子量高浓度方案化学驱采收率高。

(2)对于相同聚合物溶液,在允许注入压力下,驱油效果:等速方案 < 以等速方案平均压力恒定注入方案 < 以等速方案最高压力恒定注入方案。

(3)等黏度的两种不同聚合物交替注入驱方案驱油效果要优于这两种聚合物整体段塞驱方案。

参　考　文　献

1　李圣勇,李圣涛,陈　馥. 聚合物驱提高采收率发展现状与趋势. 化工时代,2005;19(8):40—42

2　周易辰,王建辉,袁　莹. 聚合物驱油机理及影响因素研究. 科技创新导报,2011;(34):65

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

4　吴文祥,刘万林,张　栋. 复合体系特性及驱油效果研究. 科学技术与工程,2013;13(2):472—475

5　吴文祥,侯吉瑞,张云翔,等. 聚合物分子量对聚合物驱油效率的影响. 油田化学,1996;13(3):244—247

6　吴文祥,张云祥,马继强,等. 不同相对分子质量聚合物的注入次序对其驱油效果的影响. 大庆石油学院学报,1999;23(4):15—17

7　邓庆军,赵晓京,胡　勇,等. 聚合物段塞组合及其对驱油效果影响实验研究. 大庆石油地质与开发,2005;24(2):78—79

8　吴文祥,侯吉瑞,夏慧芬,等. 不同分子量聚合物及其段塞组合对驱油效果的影响. 油气采收率技术,1996;3(24):1—6

A Study on Flooding Effect Impact of the Same Viscosity Polymer Solution

WU Wen-xiang, ZHANG Tao, MU Li-min, ZOU Ji-rui

(College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, P. R. China)

[**Abstract**]　Through indoor physical simulation experiment, the viscosity of two different molecular weight (1.9×10^7 and 2.5×10^7) polymer were designed whose solution is 78.9 mPa · s (45 ℃) in viscosity displacement experiment. viscoelasticity and flooding effects of this two polymer solution in constant injection and constant pressure injection were compared. It is shown that for both uniform injection and constant pressure injection, with reducing molecular mass of the polymers and increasing polymer solution concentration, low molecular weight high concentration solution of the displacing nearly one percent higher than that of high molecular weight low concentration solution; At constant highest pressure of constant speed injection scheme, chemical flooding recovery efficiency is highest; when the injection of PV number equal, the recovery of alternating injection two of the same viscosity polymer solution is better than separate injection two kinds of polymer solution.

[**Key words**]　polymer flooding　　equal viscosity　　oil displacing efficiency