

聚合物溶液黏度与黏弹性损失对驱油效率的影响

马云飞, 侯吉瑞*, 尚丹森, 赵凤兰, 吴凡

中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京 102249

* 通信作者, houjirui@126.com。

收稿日期: 2016-10-13

国家自然科学基金项目(51174216) 和国家科技重大专项(2011ZX05052) 联合资助

摘要 为了研究聚合物溶液在多孔介质间长距离运移过程中黏度与黏弹性的变化规律, 并确定其损失对驱油效率的影响, 本文通过室内实验对聚合物驱进行了模拟。建立了 30 m 长填砂物理模型, 在注入聚合物驱的过程中, 于模型沿程不同位置分别采出样品, 分析溶液表观黏度、聚合物分子量和浓度的变化规律。基于以上结果, 配制与不同距离下采出液性质相同的聚合物溶液进行岩心驱油实验, 并与同黏度丙三醇水溶液进行对比。实验结果表明, 聚合物驱过程中溶液浓度和聚合物分子量随运移距离的增加而降低, 基本满足线性规律; 溶液黏度随距离的增加先快速下降, 而后趋于平稳; 储能模量在近井地带的损失非常严重。聚合物驱的驱油效率提高值随着运移距离的增大而逐渐降低, 运移距离越远, 聚合物溶液的提高采收率能力越弱, 这与溶液黏度和黏弹性的损失密切相关, 其中弹性损失对驱油效率的影响比黏性更为显著。该室内研究成果可为聚合物驱的优化设计提供一定的参考。

关键词 聚合物驱; 黏度损失; 黏弹性损失; 提高采收率; 驱油效率

0 前言

聚合物驱是一种重要的提高采收率技术, 由于其机理明确、技术简单, 得到广泛应用。西方国家很早就对聚合物驱展开了研究, 美国于 1964 年进行了矿场试验, 1970 年以来, 前苏联、加拿大、英国、法国、罗马尼亚和德国等国家都开展了聚合物驱矿场试验。国内已在大庆、胜利、新疆及大港等油区开展了大规模的矿场应用, 平均提高采收率 12% 左右^[1-2]。

石油工程领域普遍认可的聚合物驱提高采收率的机理是利用聚合物黏度提高宏观波及效率、调整油水流速比^[3]。室内实验研究表明, 聚合物驱溶液与原油存在最佳水油黏度比^[4], 驱替剂与原油的黏度比宜取 2~4, 聚合物驱提高采收率 13.1%~16.8%^[5]。复合体系黏度直接受聚合物的浓度影响^[6], 聚丙烯酰胺的损失

将使体系黏度降低; 随着体系运移, 岩石孔喉对聚合物分子的剪切会使其分子量减小, 黏度降低^[7], 而这种因素造成的黏度下降是不可恢复的^[8], 因此黏度损失对开发效果存在较深的影响。近年来, 研究发现聚合物溶液不仅可以在宏观上扩大波及体积, 而且可以在微观层面上提高洗油效率^[9-10]。在常规聚合物驱之后采用高浓度、高分子量聚合物驱可以进一步提高采收率^[11], 证实黏弹性的提高确实可以提高驱油效率。聚合物由于其固有的黏弹性, 在流动过程中产生对油滴的拉伸作用, 增加了携带力, 这种作用对盲端状和膜状残余油的启动都有比较明显的助益^[12-13]。聚合物溶液黏弹性受溶液浓度、分子量以及多孔介质剪切的影响比较显著^[14-15], 当以上因素发生变化时, 溶液黏弹性的改变将对驱油效率产生影响。

但是, 聚合物溶液在地下的作用是一个长距离、

引用格式: 马云飞, 侯吉瑞, 尚丹森, 赵凤兰, 吴凡. 聚合物溶液黏度与黏弹性损失对驱油效率的影响. 石油科学通报, 2017, 01: 133-141

MA Yunfei, HOU Jirui, SHANG Dansen, ZHAO Fenglan, WU Fan. Effect of the loss of viscosity and viscoelasticity on displacement efficiency in polymer flooding. Petroleum Science Bulletin, 2017, 01: 133-141. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.013

长时间的过程,因此驱油剂在油层中的损耗^[16-17]就成为了研究者们普遍关心的问题。在地面配制的聚合物溶液注入到地下,由于运移过程中经过吸附、滞留、扩散和地层流体对溶液的稀释,以及多孔介质的剪切作用,聚合物发生损耗,黏度和黏弹性都会随之降低,这将影响聚合物驱的应用效果。

常规室内物理模拟实验模型长度通常不超过1 m,难以用来分析体系性质的变化,在本文的实验研究中建立了一套超长物理模拟驱油模型(30 m),借助该模型可以更加真实地模拟研究聚合物溶液在多孔介质流动过程中黏度与黏弹性的动态变化规律,并通过一系列室内实验分析其对提高采收率的影响,为聚合物驱的优化设计提供重要的实验参考依据。

1 实验部分

1.1 实验试剂和材料

(1) 实验试剂

聚合物:部分水解聚丙烯酰胺(北京恒聚化工),分子量分别为2 500、2 200、2 000、1 700、1 400、1 000和800万g/mol,平均水解度为26.7%;

丙三醇(分析纯),去离子水;

用于浓度检测的试剂主要有:氯化钠、水合醋酸钠、水合硫酸铝、甲酸钠、溴化钾,溴水、淀粉、碘化镉等,以上试剂均为分析纯。

(2) 实验材料

实验用油:大庆油田采油二厂脱气脱水原油与航空煤油按比例稀释配制的模拟油,黏度7.1mPa·s(45℃);

实验用水:模拟大庆地层水,矿化度5130.36 mg/L,其中成分为:

NaHCO₃ 142 g/L、Na₂SO₄ 0.043 g/L、Na₂CO₃ 0.517 g/L、MgCl₂·6H₂O 0.041 g/L、CaCl₂ 0.090 g/L、KCl 0.061 g/L、NaCl 1.237 g/L;

油砂:大庆油田天然岩心经过抽提、解集处理得到的油砂,水湿、粒度40~100目、黏土含量8%~12%。

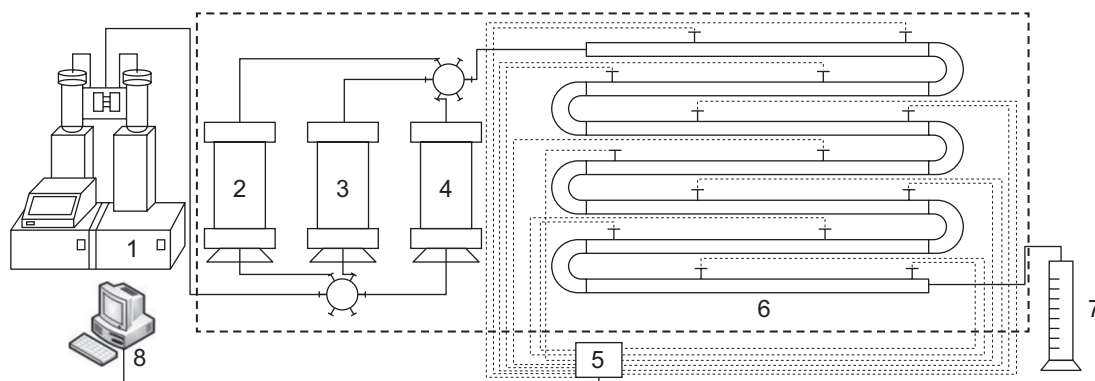
岩心:人工压制岩心,规格为4.5×4.5×30 cm,水测平均渗透率735×10⁻³ μm²。

1.2 实验装置和仪器

物理模拟驱油实验装置包括:HW-II型恒温箱(Haian Petroleum Scientific Instrument, LTD, Jiangsu), HAS-100HSB型恒压恒速泵(Huaan Scientific Instrument, LTD, Jiangsu), 5L中间容器,岩心夹持器(4.5×4.5×30 cm)、30 m长填砂模型,压力传感器,数据采集系统以及所需耐压阀门、管线若干。

其中30 m长填砂物理模型为自主研制,由35根直径为2.5 cm的填砂管连接而成,管中填充油砂约16 kg。为了测试不同距离下聚合物溶液的黏度、浓度和聚合物分子量的变化,每间隔一段距离设计一个采样点。整个实验装置由驱动系统、长填砂管物理模型、压力测量系统等几部分组成,驱动系统由中间容器和柱塞泵构成,压力测量系统包括数据采集器、若干个压力传感器以及一台数据计算器。实验流程如图1所示,采样测压点的分布见表1。

聚合物溶液性能分析实验仪器包括:DV-II+Pro型Brookfield黏度计(Brookfield Engineering Labs, 美



1-恒压恒速泵; 2, 3, 4-中间容器(分别盛放地层水、原油和驱替剂); 5-压力传感器; 6-填砂物理模型; 7-油水分离装置; 8-数据采集系统; 虚线框表示恒温箱

图1 实验装置图(采样点以具体实验参数为准)

Fig. 1 Flooding experiment with the 30 m sand packed model (sampling points are decided by concrete experiment)

表 1 采样点的分布

Table 1 Distribution of sampling points

序号	采样点距入口距离/m	采样距离占模型总长比例/%
1	0.44	1.47
2	1.28	4.27
3	5.54	18.47
4	6.73	22.43
5	8.93	29.77
6	10.64	35.47
7	12.52	41.73
8	14.79	49.30
9	16.81	56.03
10	21.74	72.47
11	26.81	89.37
12	29.36	97.87

国)、Physica MCR301 界面流变仪(Anton Paar, 奥地利)、乌氏黏度计、UV2000 型紫外-可见分光光度计(Rainin Instrument, 美国)以及其他玻璃仪器。

1.3 实验步骤及方案

(1) 超长填砂模型驱油实验

①按照图 1 搭建驱替实验装置, 检查体系密闭性。

②将填砂模型抽真空 72 h, 以 0.4 mL/min 的流速饱和地层水, 测量模型孔隙度及水相渗透率。用油驱替填砂模型, 注入速度 0.4 mL/min, 直到出口端采出液不含水, 建立起束缚水饱和度, 之后老化原油 10 d。

③进行水驱油实验, 注水速度 0.4 mL/min, 至出口端含水率达到 98%。

④在一次水驱之后, 以 0.4 mL/min 的速度注入聚合物溶液 1.0 PV, 进行二次水驱, 注入速度 0.4 mL/min, 至采出液含水率大于等于 98%。

以上所有步骤都在 45 °C 恒温下进行。聚合物分子量 2 500 万, 初始浓度 1 200 mg/L, 初始黏度 56 mPa·s。

(2) 样品采集和分析

为了能同时分析聚合物运移全过程在各取样点的性质, 注入量设计为 1.0 PV, 在理想状态下聚合物段塞刚好填满模型的孔隙空间。在驱替过程中对模型沿程各采样点进行聚合物溶液样品采集。从注入聚

物溶液开始, 在注入量达 1.0 PV 时于各采样点收集样品一次, 每个样品 15 mL; 分别测定采出溶液的表观黏度、聚合物浓度和分子量。

具体测试条件和方法如下:

①用布氏黏度计测量黏度, 条件为定剪切速率 7.34 s⁻¹, 测定温度为 45 °C。

②用淀粉-碘化镉法测定聚合物浓度^[18]。

③聚合物分子量以黏度法测定^[19]。

(3) 岩心驱替实验

根据采得的各项样品溶液的聚合物分子量和浓度, 以现有的不同分子量部分水解聚丙烯酰胺配制驱替剂, 代表运移至不同距离处的聚合物溶液, 以界面流变仪分别测定溶液的储能模量和损耗模量。以不同比例丙三醇和去离子水混合配制纯黏流体作为对比驱替剂, 其黏度分别与不同运移距离处的聚合物溶液一致, 代表弹性完全损失后的驱替剂溶液, 以界面流变仪分别测定溶液的储能模量和损耗模量。

①按照图 1 搭建驱替实验装置, 将图中超长填砂模型替换为岩心夹持器, 检查体系密闭性。

②将系统抽真空 2 h, 以 0.4 mL/min 的流速饱和地层水, 测量模型孔隙度及水相渗透率。用油驱替填砂模型, 注入速度 0.4 mL/min, 直到出口端采出液不含水, 建立起束缚水饱和度, 之后老化原油 48 h。

③进行水驱油实验, 注水速度 0.4 mL/min, 至出口端含水率达到 98%。

④在一次水驱之后, 以 0.4 mL/min 的速度连续注入聚合物溶液/丙三醇水溶液, 直到出口端不再产油。

上述实验均在 45 °C 恒温进行。

2 实验结果与分析

2.1 聚合物溶液性质随运移距离的变化

30 m 长填砂模型中聚合物驱的实验结果如表 2 所示, 注入 1.0 PV 聚合物, 在水驱基础上提高采收率 23.7%。虽然聚合物溶液浓度较低(1200 mg/L), 但注入量(1.0 PV)非常高, 且模型为一维均质, 不存在平面波及问题和层间矛盾, 因此最终总采出程度比较高。

注入量为 1.0 PV 时, 理论上所注入的聚合物溶液

表 2 模型参数及采收率

Table 2 Parameters of the model and the recovery efficiency

孔隙体积/cm ³	孔隙度/%	水相渗透率/10 ⁻³ μm ²	初始含油饱和度/%	水驱采收率/%	聚合物驱采收率/%	最终采收率/%
4287	29.1	815	68.5	43.8	23.7	67.5

段塞刚好到达采出端,并占据全部孔隙空间,此时对沿程12个采样点进行样品采集,以观察聚合物性能随运移距离的变化。观察发现,随运移距离增加,聚合物分子量和浓度基本呈现线性下降的变化规律,如图2所示。随着聚合物溶液注入及其在孔隙间的运移,受吸附、滞留等影响,聚合物浓度逐渐下降,受岩心孔隙喉道的剪切、拉伸作用,聚合物分子链发生断裂,分子量逐渐降低,这二者的共同作用导致聚合物溶液的黏度发生损失。

由于采样点取得的样品体积较小,不足以测定黏弹性,更无法用于驱油,因此需要根据采出液聚合物分子量和浓度的测定信息,拟合出分子量和浓度的线性回归曲线,如图2所示。再用不同分子量聚合物,参照回归公式配制替代的聚合物溶液,用以测定黏弹性,并进行驱油实验。

具体步骤如下:

①已知试剂部分水解聚丙烯酰胺的平均分子量

(如表3所示),根据分子量线性回归曲线(图2),得知该分子量聚合物所对应的回归距离(表3)。

②根据浓度线性回归曲线(图2)和回归距离(表3),可以求得该分子量聚合物在该距离下的回归浓度(表3)。

③最后用该试剂配制回归浓度的聚合物溶液,如表3所示。

所配制的聚合物溶液与采样点取出样品的黏度对比见图3,可以看出,所配制溶液的黏度、聚合物浓度和分子量重合性良好,可以代表聚合物段塞运移到该距离处的溶液性质。

由图3可以发现,聚合物溶液的黏度随运移距离增加呈现下降趋势。在近井地带下降比较迅速,随运移距离的增加下降趋势逐渐放缓。在运移距离达到一半时,溶液黏度已经下降为初始值的1/3左右,而出口端采出液黏度仅为4.2 mPa·s,流度控制能力基本损失。由此可见,随着运移距离增加,黏度损失是不可

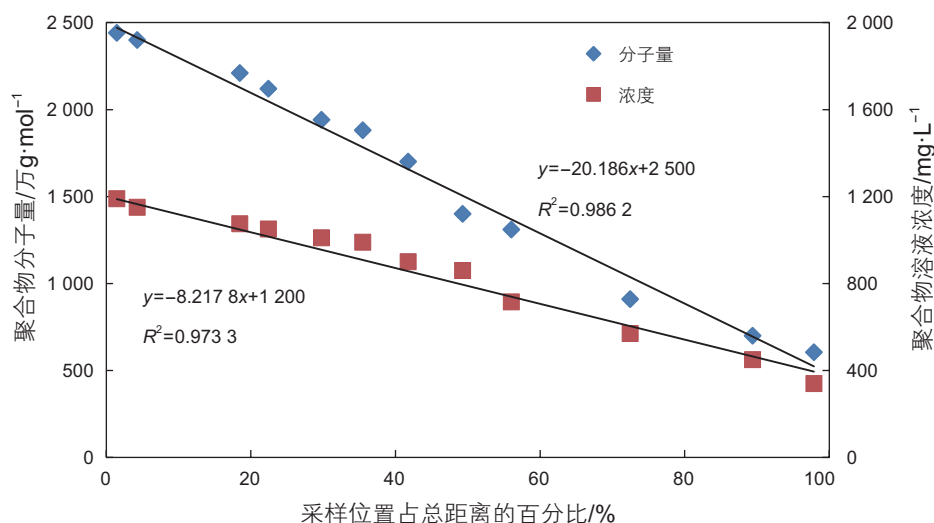


图2 聚合物浓度及分子量与运移距离的关系

Fig. 2 Polymer concentration and molecular weight change curves vs. distance

表3 配制聚合物溶液参数

Table 3 Parameters of the polymer solutions prepared

体系编号	配制溶液分子量/(万 g/mol)	回归距离/%	回归浓度/mg/L	配制溶液浓度/(mg/L)	配制溶液黏度/(mPa·s)
#1	2 500	0	1 200.00	1 200	55.7
#2	2 200	14.62	1 070.34	1 070	47.3
#3	2 000	24.36	983.90	980	36.6
#4	1 700	38.98	854.23	850	27.6
#5	1 400	53.59	724.57	720	15.7
#6	1 000	73.08	551.69	550	12.1
#7	600	92.57	378.80	380	4.4

避免的，进入油藏深部后，溶液的剩余黏度应该很小，据此推测在油藏深部必然存在较为可观的剩余油有待进一步开发。

综合上述分析，本文用配制溶液代替实验采出液进行了黏弹性测定，并进行 30 cm 岩心驱替实验。

测定配制溶液的储能模量 G' 和损耗模量 G'' ，表征黏弹性与运移距离的关系，如图 4 所示(设定角频率 $=1.0 \text{ s}^{-1}$)。由图 4 可以看出，聚合物溶液的储能模量与损耗模量都随运移距离的增加而下降，但前者下降更快。当运移距离超过 50% 时，溶液的储能模量已经降低到不足初始值的 5%，在接近采出端处已经接近 0。以上结果说明，随着运移距离的增大，聚合物溶液的弹性比黏性下降更多、下降速度也更快，尤其在运移距离超过 1/2 后，溶液仍具有一定的黏性，但弹性

几乎完全损失。

2.2 黏度与弹性损失对驱油效率的影响

由于岩心为一维均质，不存在宏观波及体积的差别，所以驱油效率提高值 ΔE_D 可以近似代表采收率提高值 ΔRe 。以配制的溶液进行岩心驱替实验，在水驱基础上连续注入聚合物溶液直到不再产油为止，以评价该体系的极限驱油效率。同时，为了考察驱替剂弹性对驱油效率的贡献，以丙三醇和去离子水按不同比例配制或与聚合物溶液表观黏度相近的溶液，作为等表观黏度下纯黏流体驱替剂，在相同条件下进行岩心驱替实验，考察其极限驱油效率，实验结果如表 4 所示。

定义距离 i 处的溶液黏度损失率为：

$$\eta_i = (\mu_0 - \mu_i) / \mu_0 \times 100\% \quad (1)$$

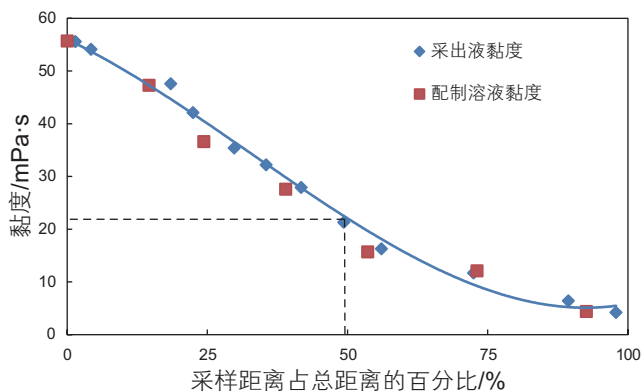


图 3 样品测量黏度与配制溶液黏度
Fig. 3 Viscosity of the samples and the solutions prepared

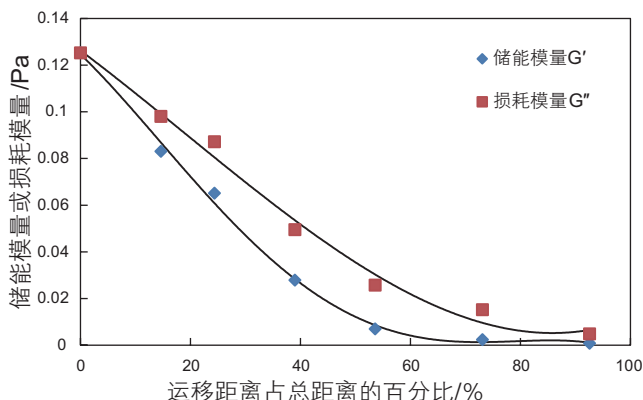


图 4 配制溶液黏弹性与运移距离的关系
Fig. 4 Viscoelasticity of the solutions prepared change curve vs. distance

表 4 岩心驱替实验结果

Table 4 Result of core flooding experiments

驱替方式	编号	水测渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	配制黏度 /mPa·s	储能模量/Pa	采收率/%		
					水驱	聚合物驱/丙三醇驱	最终
聚合物驱	SD-01	721.1	55.7	0.125330	47.41	24.17	71.58
	SD-02	735.5	47.3	0.083106	48.12	18.26	66.38
	SD-04	742.7	36.6	0.065182	45.37	15.10	60.47
	SD-07	737.0	27.6	0.027917	46.56	12.55	59.11
	SD-08	729.7	15.7	0.006976	47.17	9.63	56.80
	SD-09	740.2	12.1	0.002381	48.60	7.22	55.82
	SD-11	733.8	4.4	0.000872	47.87	2.70	50.57
	丙三醇驱	WF-01	744.1	55.4	0	47.04	10.94
WF-02		732.1	46.3	0	46.75	8.55	54.36
WF-03		719.8	37.3	0	47.14	7.25	53.92
WF-06		755.9	28.1	0	47.05	5.82	52.88
WF-07		724.5	15.8	0	47.21	5.20	52.41
WF-10		746.0	11.7	0	45.50	4.79	50.29
WF-11		732.4	3.6	0	46.72	2.41	49.13

储能模量损失率为:

$$\eta'_i = (G'_0 - G'_i) / G'_0 \times 100\% \quad (2)$$

驱油效率提高值的损失率:

$$\rho_i = (\Delta E_{D0} - \Delta E_{Di}) / \Delta E_{D0} \times 100\% \quad (3)$$

其中, μ_0 , G'_0 和 ΔE_{D0} 分别表示聚合物溶液在入口处的初始黏度、储能模量及驱油效率提高值; μ_i 、 G'_i 、 ΔE_{Di} 分别表示距离 i 处的溶液黏度、储能模量和驱油效率提高值。

以SD-01 实验数据为基准, $\mu_0 = 55.7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $G'_0 = 0.125 \text{ 330 Pa}$, $\Delta E_{D0} = 24.17\%$ (此值为提高采收率的极限值)。

由图 5 可见, 随着运移距离增大, 聚合物黏度损失不断升高, 同时伴随着弹性损失, ΔE_D 也同步逐渐损失。当运移距离达到 53.6% 时, 黏度损失超过了 70%, 储能模量损失更高达 94%, ΔE_D 的损失也达到了 60%, 表明当聚合物溶液段塞运移超过 50% 距离时, 其提高驱油效率的能力不足初始值的 40%。当溶液运移至距离注入端 92.6% 时, 弹性几乎完全损失, 黏度损失也超过 90%, 此时 ΔE_D 的损失率为 88.9%, 即表示其提高驱油效率能力仅为初始值的约 11%。此外, 在运移距离超过 50% 后, G' 损失殆尽, 趋于平稳, 而随着黏度的损失, ΔE_D 会继续损失, 可以认为当运移距离低于 50% 距离时, ΔE_D 的损失是由黏性和弹性的损失共同造成的, 而超过 50% 之后, 黏性损失对 ΔE_D 的影响更为显著。

为了研究弹性和黏性对驱油效率的具体贡献, 通过纯黏性流体丙三醇水溶液驱油实验评价其提高采收率效果, 并与聚合物溶液进行对比, 如图 6 和图 7 所示。

由表 4 和图 6 可知, 在实验条件下, 驱油效率提

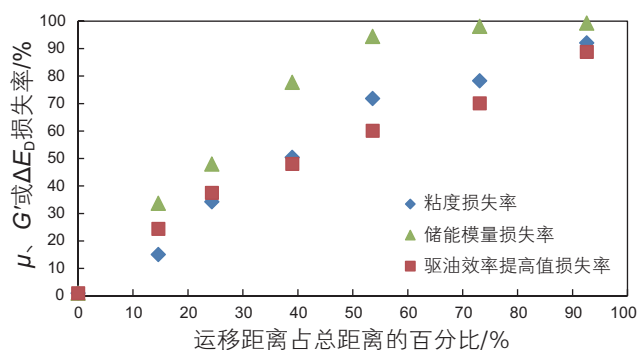


图 5 聚合物溶液黏度、弹性损失与驱油效率损失的关系
Fig. 5 Viscosity, elasticity and displacement efficiency loss vs. distance

高值和溶液黏度随运移距离的变化趋势相仿。在黏度相近的条件下, 丙三醇溶液的入口 ΔE_D 仅有 10.94%, 聚合物驱的较高, 为 24.17%, 说明弹性对驱油效率的影响非常显著。随着体系的注入和运移, 驱油效率随着运移距离的增大而降低, 而且丙三醇的驱油效率明显低于聚合物驱。随着运移距离的增大, 二者的差距逐渐缩小。在接近采出端处, 聚合物溶液的弹性几乎完全损失, 显示出近似纯黏流体特征, 其驱油效率与丙三醇溶液相近 (ΔE_D 不足 3%)。

由于丙三醇溶液为纯黏流体, 以丙三醇驱的 ΔE_D 表示黏性对驱油效率的贡献, 则弹性对驱油效率的贡献值为同黏度聚合物驱 ΔE_D 与丙三醇驱 ΔE_D 的差值, 其结果如图 7 所示。可以看出, 随着运移距离的增大, 弹性和黏性对驱油效率的贡献都在降低, 而弹性的贡献下降更快。在入口处, 弹性对聚合物驱驱油效率的贡献率为 54.7%, 且在前 39% 的距离内弹性的贡献都高于黏性。在超过 50% 距离后, 由于储能模量下降迅速, 弹性贡献率降低, 在 53.6% 处已不到 50%。随着距离的进一步增大, 弹性影响越来越弱, 在接近出口端处, 弹性的贡献率仅为 10% 左右。以上结果表明, 如果未经吸附、滞留和剪切的损失, 聚合物驱弹性的贡献是高于黏性的; 但随着运移距离的增大, 聚合物浓度和分子量的降低, 使弹性严重损失, 导致其贡献率不断降低。因此可以判断, 弹性损失是导致聚合物溶液在油藏深部提高采收率能力不断减弱的主要因素。

综上所述, 制约聚合物驱驱油效率提高的一个关键因素就是黏弹性的降低, 弹性对聚合物驱的贡献高于黏性, 同黏度下纯黏性驱替剂的驱油效率远低于黏弹性聚合物溶液。弹性损失对聚合物驱的影响非常大, 随着运移, 经剪切和滞留后失去弹性的溶液驱油效率

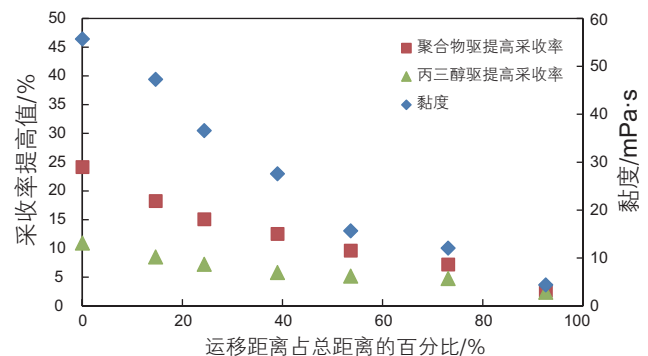


图 6 聚合物驱与丙三醇驱提高采收率与运移距离的关系
Fig. 6 Enhanced recovery efficiency by polymer flooding and glycerol flooding vs. distance

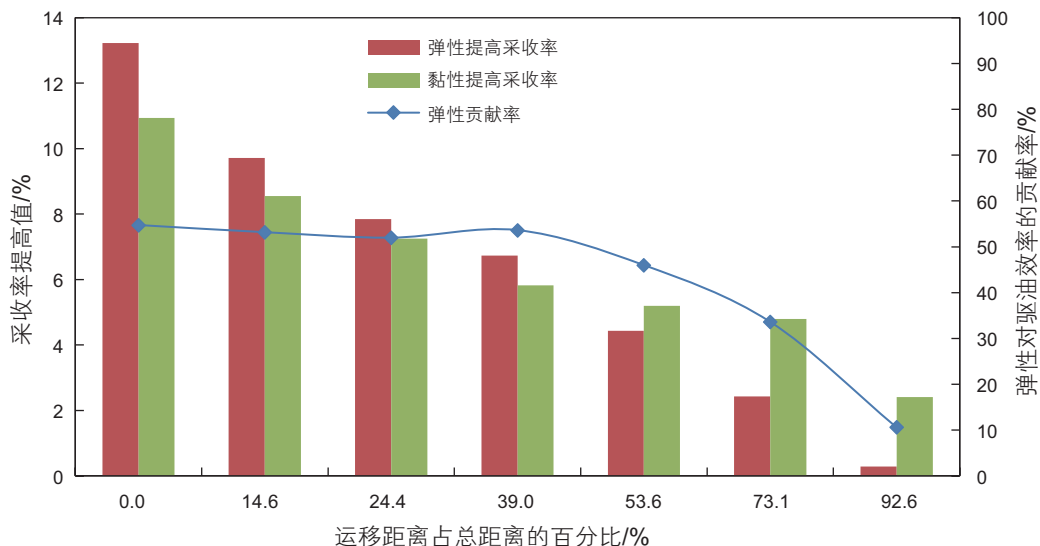


图 7 弹性对驱油效率的贡献

Fig. 7 Contribution to displacement efficiency by elasticity

很低。因此，在对聚合物驱进行优化时，不应一味地以提高溶液的黏度为目的提高聚合物的分子量和用量，应优先考虑如何提高和维持聚合物驱的弹性，提高溶液的注入能力和抗剪切能力。

3 结论

(1) 实验条件下，聚合物驱过程中溶液浓度和聚合物分子量随距离的增加而降低，基本满足线性下降规律。黏度随体系运移而严重损失，运移至一半距离处黏度已经降为初始值的 1/3。但弹性比黏性下降更迅速，运移至 50% 距离处弹性已经降低到不足初始值的

5%。

(2) 相同黏度下，黏弹性流体的驱油效率高于纯黏性流体，二者的驱油效率随运移距离的增大而降低，且差距逐渐缩小。

(3) 当运移距离小于 39% 时，弹性对聚合物驱油效率的贡献高于黏性，但弹性随运移距离增大而严重损失。当超过 53.6% 距离时，弹性对驱油效率的贡献率不足 50%，至出口端仅为 10% 左右，弹性损失是导致聚合物驱在油藏深部提高采收率能力减弱的主要因素。

参考文献

- [1] 刘朝霞, 王强, 孙盈盈, 等. 聚合物驱矿场应用新技术界限研究与应用[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(2): 22-24. [LIU Z X, WANG Q, SUN Y Y, et al. Study and application of new technological limit for polymer flooding in field application. PGRE, 2014, 21(2): 22-24]
- [2] ABIDIN A Z, PUSPASARI T, NUGROHO W A. Polymers for enhanced oil recovery technology[J]. Procedia Chemistry, 2012, 4(12): 11-16.
- [3] PEYMAN B, PEZHMAN K, SEDIGHEH M, et al. A novel approach for modeling and optimization of surfactant/polymer flooding based on Genetic Programming evolutionary algorithm[J]. Fuel, 2016, 179: 289-298.
- [4] 郭兰磊, 李振泉, 李树荣, 等. 一次和二次聚合物驱驱替液与原油黏度比优化研究[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 738-741. [GUO L L, LI Z Q, LI S R, et al. Optimization of oil-to-polymer viscosity ratios in the primary and secondary polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 738-741.]
- [5] 王克亮, 廖广志, 杨振宇, 等. 三元复合和聚合物驱油液黏度对驱油效果影响实验研究[J]. 油田化学, 2001, 18(4): 354-357. [WANG K L, LIAO G Z, YANG Z Y, et al. The effect on oil displacement efficiency of viscosity of alkaline-surfactant-polymer and polymer flooding solutions[J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(4): 354-357.]
- [6] ZHU H, LUO J, KLAUS O, et al. The impact of extensional viscosity on oil displacement efficiency in polymer flooding[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2012, 414(46): 498-503.

- [7] 冯世德. 大庆油田聚合物溶液黏度控制因素研究[D]. 东北石油大学, 2013.[FENG S D. Study on controlling factors of viscosity of polymer solution in daqing oilfield[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.]
- [8] 雷巧会, 田根林. 聚合物黏度剪切损失与恢复的研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 1997(6): 36–38.[LEI Q H, TIAN G L. A study on shear loss of polymers and its restoration [J]. Journal of Xian Petroleum Institute, 1997(6): 36–38.]
- [9] 王德民, 程杰成, 杨清彦. 黏弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率[J]. 石油学报, 2000, 21(9): 45–51.[WANG D M, CHENG J C, YANG Q Y, et al. Viscous-elastic polymer can increase microscale displacement efficiency in cores[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 45–51.]
- [10] 谢毅, 尹洪军, 钟会影, 等. 黏弹性聚合物溶液微观波及效率分析[J]. 特种油气藏, 2013, 20(5): 110–113.[XIE Y, YIN H J, ZHONG H Y, et al. Analysis on microscopic sweep efficiency of viscoelastic polymer solution[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(5): 110–113.]
- [11] 朱凯. 常规聚合物驱后高浓度聚合物溶液黏弹性对驱油效果的影响研究[J]. 中国科技博览, 2014(40): 140.[ZHU K. The effect of viscoelastic of high concentration polymer solution on recovery efficiency after conventional polymer flooding[J]. China Science and Technology Review, 2014(40): 140.]
- [12] 张立娟, 岳湘安, 刘中春, 等. 黏弹性流体在盲端孔隙中的流场[J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(6): 748–755.[ZHANG L J, YUE X A, LIU Z C, et al. Flow field of viscoelastic fluid in pores with dead ends[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(6): 748–755.]
- [13] 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[J]. 东北石油大学学报, 2007, 31(1): 25–30.[WANG G, WANG D M, XIA H F, et al. Effect of viscoelasticity of HPAM solution on residual oil film[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(1): 25–30.]
- [14] 叶仲斌, 彭杨, 施雷庭, 等. 多孔介质剪切作用对聚合物溶液黏弹性及驱油效果的影响[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 59–62.[YE Z B, PENG Y, SHI L T. The influence of shear action in porous medium on viscoelasticity and oil displacement efficiency of polymer[J]. Petroleum Geology & Recovery Efficiency, 2008, 15(5): 59–62.]
- [15] 夏惠芬, 张九然, 刘松原. 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): 37–41.[XIA H F, ZHANG J R, LIU S Y. Viscoelasticity and factors of polymer solution[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(1): 37–41.]
- [16] WEATHERILL A. Surface development aspects of alkali-surfactant-polymer (ASP) flooding[C]. International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 2009.
- [17] YUAN S Y, YANG P H, DAI Z Q, et al. Numerical simulation of alkali/surfactant/polymer flooding. International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, China, 1995.
- [18] 田利, 邹明珠, 许宏鼎. 采油污水中部分水解聚丙烯酰胺浓度的测定. 吉林大学学报, 2003, 41(2): 224–227.[TIAN L, ZOU M Z, XU H D, et al. Determination of concentration of hydrolyzed polyacrylamide in waste from oil extraction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Jilinensis, 2003, 41(2): 224–227.]
- [19] 杨菊萍. 黏度法测定部分水解聚丙烯酰胺的分子量[J]. 高分子学报, 2001(6): 783–786.[YANG J P. Determination of molecular weight of partially hydrolyzed polyarylamide by viscosimetry[J]. Acta Polymerica Sinica, 2001, 34(6): 783–786.]

Effect of the loss of viscosity and viscoelasticity on displacement efficiency in polymer flooding

MA Yunfei, HOU Jirui, SHANG Dansen, ZHAO Fenglan, WU Fan

EOR Institute of China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract To investigate the trends of change of viscosity and viscoelasticity during long distance migration in polymer flooding and to research the effect of the loss of viscosity and viscoelasticity on displacement efficiency, a series of laboratory physical experiments were conducted to simulate polymer flooding. A 30 m long sand packed model was built for the physical simulation. Following the injection, samples were obtained from sampling points along the model, and the properties of the samples such as polymer concentration, molecular weight and viscosity were analyzed. Based on the results, polymer solutions which have similar properties to the samples were prepared for the core displacement experiments. For comparison, glycerol solutions similar in viscosity were used as displacement agents in the same conditions. The results indicated that polymer concentration and molecular weight decreased with increase in the migration distance, and followed an approximately linear trend. The viscosity declined rapidly first, and then stabilized with the distance increase. The storage modulus decreased sharply in the near inlet area.

Furthermore, the increment of displacement efficiency decreased with increasing distance, which was closely related to the loss of viscosity and viscoelasticity. This suggested that elasticity loss had a deeper impact than viscosity on displacement efficiency. This research can provide a basis for the optimization of polymer flooding design.

Keywords polymer flooding; viscosity loss; viscoelasticity loss; enhanced oil recovery; displacement efficiency

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.013

(编辑 马桂霞)