

# 萨中油田四种驱油体系对油藏适应性对比分析

刘进祥<sup>1</sup>, 孙学法<sup>1</sup>, 卢祥国<sup>1</sup>, 张云宝<sup>1,2</sup>, 肖龙<sup>3</sup>, 谢坤<sup>1</sup>, 王婷婷<sup>1</sup>, 赵劲毅<sup>4</sup>

(1. 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; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452; 3. 中国石油大庆油田第一采油厂, 黑龙江大庆 163001; 4. 中国石油大庆油田采油二厂, 黑龙江大庆 163414)

**摘要:** 为保证化学驱在大庆油田顺利实施, 开展了相同条件下聚合物溶液、聚表二元体系、强碱三元复合体系和弱碱三元复合体系的黏度、分子聚集体尺寸( $D_h$ )、分子聚集体形态和岩心渗透率极限及影响因素研究。结果表明, 相同条件下体系的黏度和 $D_h$ 大小顺序为聚表二元>聚合物溶液>弱碱三元>强碱三元; 而岩心渗透率极限大小顺序为聚表二元>强碱三元>聚合物溶液>弱碱三元, 这是因为 $D_h$ 越大, 驱油体系能通过的岩心渗透率越大, 渗透率极限越大。但强碱三元与岩心中矿物反应, 堵塞岩石孔道, 导致其渗透率极限增大。四种驱油体系黏度和渗透率极限均随剪切强度增加而下降, 但剪切作用使聚合物分子发生定向排列, 从而使驱油体系中 $D_h$ 受到剪切后变化规律不明显。

**关键词:** 驱油体系; 油藏适应性; 分子聚集体尺寸; 分子聚集体形态; 渗透率极限

中图分类号: TE357

文献标识码: A

## Contrastive analysis on reservoir adaptability of four kinds of oil-displacement systems of Sazhong oilfield

Liu Jinxiang<sup>1</sup>, Sun Xuefa<sup>1</sup>, Lu Xiangguo<sup>1</sup>, Zhang Yunbao<sup>1,2</sup>, Xiao Long<sup>3</sup>, Xie Kun<sup>1</sup>, Wang Tingting<sup>1</sup> and Zhao Jinyi<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery of Educational Ministry, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Bohai Oil Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC(China) Co., Ltd., Tianjin 300452, China; 3. No.1 Oil Production Plant of Daqing Oilfield, CNPC, Daqing, Heilongjiang 163001, China; 4. No.2 Oil Production Plant of Daqing Oilfield, CNPC, Daqing, Heilongjiang 163414, China)

**Abstract:** For the success of the implement of chemical flooding in Daqing oilfield, the viscosity, molecule coil size and molecular configuration of polymer solution, polymer/surfactant compound system, strong base alkali-surfactant-polymer (ASP) system and weak base ASP system, and the permeability range of the shale core and its influencing factors were studied under the same condition. The results showed that under the same condition, the viscosity and molecule coil size were in a descending order as: polymer/surfactant dual system, polymer solution, weak base ASP system, and strong base ASP system. While for the core permeability limit, the order was: polymer/surfactant dual system, strong base ASP system, polymer solution, and weak base ASP system. The reason was the bigger the molecule coil size was, the higher the core permeability that the oil-displacement systems could get through and the greater the permeability limit would be. But the strong base ASP system could react with the minerals in the cores, which resulted in the blocking of the core pores and the increase of permeability limit. The viscosity and permeability range of four kinds of oil-displacement system decreased with the increase of the shear strength, but the shearing action led to the oriented arrangement of the polymer molecules, the change law of polymer molecules in the oil-displacement system after shearing action was unobvious.

**Key words:** oil-displacement system, reservoir adaptability, molecular coil size, molecular configuration, permeability limit

收稿日期: 2017-11-09。

第一作者简介: 刘进祥(1980—), 男, 博士, 讲师, 油田化学和提高油气采收率研究。

基金项目: 国家自然科学基金“抗盐型聚合物油藏适应性及其改进方法基础研究”(51574086); 国家科技重大专项“渤海双高油田多级窜逸堵调驱一体化技术研究及示范”(2016ZX05058003-010); 黑龙江省东北石油大学研究生创新科研重点项目“LD10-1油田化学驱注入工艺优化研究”(YJSCX2017-007NEPU)。

大庆油田自1996年在Ⅰ类油藏开展化学驱以来,取得了良好的驱油效果<sup>[1]</sup>,其中聚合物在水驱的基础上提高采收率10%左右<sup>[1-2]</sup>,三元复合驱在水驱的基础上提高采收率20%左右<sup>[3-4]</sup>。近些年在Ⅱ类油藏也逐步开展了化学驱,同样也取得了较好的效果<sup>[5]</sup>,但必须看到,有些化学驱过程中存在注入压力过高,驱油剂难以进入油藏的深层,生产井产液量下降等问题<sup>[6]</sup>。这主要是因为驱油体系与油藏匹配性较差,从而导致驱油体系堵塞端面,或者堵塞岩石孔喉所致,因此,研究驱油体系与油藏的适应性显得尤为重要。针对大庆油田的油藏地质特征,以大庆萨中油田储层条件为例,研究了相对分子质量、聚合物浓度以及剪切作用等对聚合物溶液、聚合物—表面活性剂二元体系(以下简称聚表二元体系)和ASP三元复合体系的黏度、分子聚集体尺寸、分子聚集态形态和岩心渗透率极限影响,并进行对比分析,为现场能够顺利实施化学驱提供有力依据。

## 1 实验条件

### 1.1 化学药剂

聚合物为大庆炼化公司生产部分水解聚丙烯酰胺干粉(HPAM),相对分子质量分别为 $400 \times 10^4$ 、 $800 \times 10^4$ 、 $1\,200 \times 10^4$ 、 $1\,900 \times 10^4$ 和 $2\,500 \times 10^4$ ,有效含量分别为88.0%、88.0%、90.3%、90.0%和90.91%。表面活性剂为大连戴维斯公司生产非离子型表面活性剂DWS(有效含量为40%,白色乳状液)、大庆东昊公司生产重烷基苯磺酸盐(有效含量为50%)和大庆炼化公司生产石油磺酸盐(有效含量40%)。碱包括NaOH和 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,有效含量分别为96.0%和99.8%。四种驱油体系为:①聚合物溶液;②聚表二元体系:聚合物溶液+3 000 mg/L DWS;③强碱三元复合体系:聚合物溶液+3 000 mg/L重烷基苯磺酸盐+12 000 mg/L NaOH;④弱碱三元复合体系,聚合物溶液+3 000 mg/L石油磺酸盐+12 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。

### 1.2 实验用水

实验用水为大庆采油一厂污水和清水,水中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 和总矿化度质量浓度分别为231.20 mg/L、34.10 mg/L、24.30 mg/L、225.10 mg/L、88.70 mg/L、36.00 mg/L、90.00 mg/L、

729.3 mg/L和1 265.0 mg/L、32.10 mg/L、7.30 mg/L、1 708.56 mg/L、780.12 mg/L、9.61 mg/L、210.07 mg/L、4 012.7 mg/L。使用前经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤。

### 1.3 岩心

渗透率极限实验为石英砂环氧树脂胶结人造均质岩心<sup>[7-8]</sup>,岩心渗透率 $K_g$ 为 $(30 \sim 200) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,外观几何尺寸为 $\phi 2.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。部分压汞实验及碱驱实验岩心为天然岩心,外观几何尺寸为 $\phi 2.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。

### 1.4 实验仪器

采用DV-II型布氏黏度仪测试黏度,转子为0号,转速为6 r/min,测试温度45  $^{\circ}\text{C}$ 。

采用美国布鲁克海文BI-200SM型广角动/静态光散射仪系统(Brookhaven Instruments Cop, USA)测试聚合物分子聚集体尺寸 $D_h$ (水动力学直径)。

采用日立(Hitachi)S-3400N扫描电镜(SEM)观测驱油体系中聚合物分子聚集体形态。

渗透率极限实验设备及流程见参考文献[9]。实验温度45  $^{\circ}\text{C}$ 。压力梯度是描述化学剂在多孔介质内滞留量大小的技术指标,通常用注入压力与岩心长度的比值表示,其定义为:压力梯度= $\Delta P/\Delta L$ (MPa/m),式中 $\Delta P$ 为压力差,MPa; $\Delta L$ 为距离,m。上述注入过程应当保持注液速度相同。

采用TRQ/Y2002型氦孔隙度仪渗透率测定装置,检测孔喉半径中值、岩心毛管压力曲线、孔喉分布峰位、孔喉分布频率和渗透率贡献率等参数变化。

## 2 结果分析

### 2.1 黏度

1) 驱油体系类型和聚合物相对分子质量对驱油体系黏度的影响

采用清水配制聚合物浓度( $C_p$ )为5 000 mg/L聚合物母液,然后用污水稀释至 $C_p=1\,000 \text{ mg/L}$ ,并加入相应浓度表面活性剂和碱。四种驱油体系黏度实验结果见表1。

从表1可以看出:①在相同条件下,随聚合物相对分子质量增加,聚合物溶液黏度逐渐增加;②四种驱油体系相比较,聚表二元体系黏度最大,聚合物溶

表1 驱油剂类型和相对分子质量对驱油体系黏度影响结果 ( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

Table 1 Influence of flooding type and molecular weight on flooding systems viscosity ( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

mPa·s

驱油体系	驱油体系中不同聚合物相对分子质量的黏度				
	$400\times 10^4$	$800\times 10^4$	$1\ 200\times 10^4$	$1\ 900\times 10^4$	$2\ 500\times 10^4$
聚合物溶液	4.6	12.5	17.7	21.1	27.7
聚/表二元体系	5.1	12.8	18.2	21.7	28.3
强碱三元	3.5	5.8	8.6	10.5	11.8
弱碱三元	4.2	6.6	9.2	11.2	12.8

液和弱碱三元复合体系次之,强碱三元复合体系最小,这主要是因为溶剂水中阴离子对体系黏度影响较小,而阳离子对黏度影响较大<sup>[10-11]</sup>。阳离子浓度和离子半径影响聚合物分子扩散双电层的厚度,而双电层厚度的改变会影响HPAM分子带电程度和卷曲程度,进而影响聚合物溶液黏度<sup>[12]</sup>。阳离子与HPAM链上的羧酸根静电引力作用,降低HPAM分子表面的电荷密度,造成分子链卷曲,同时减弱了极性基团的溶剂化能力,释放大量的“束缚水”,并使黏度显著降低。

## 2) 剪切强度对驱油体系黏度的影响

采用清水配制  $C_p=5\ 000\ \text{mg/L}$  聚合物母液,然后用污水稀释至  $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ ,采用warning搅拌器对其进行剪切作用(黏度损失分别为15%(2 s),30%(4 s)和45%(10 s)),最后加入相应浓度表面活性剂和碱。四种驱油体系黏度实验结果见表2。

从表2可以看出,随剪切强度增加,驱油体系黏度逐渐下降。在四种驱油体系中,聚/表二元体系保

表2 剪切强度对驱油体系黏度影响结果 ( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

Table 2 Influence of shear strength on flooding systems viscosity ( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

mPa·s

驱油体系	驱油体系中不同聚合物相对分子质量的黏度								
	$1\ 200\times 10^4$			$1\ 900\times 10^4$			$2\ 500\times 10^4$		
	黏损 15%	黏损 30%	黏损 45%	黏损 15%	黏损 30%	黏损 45%	黏损 15%	黏损 30%	黏损 45%
聚合物溶液	14.5	12.4	11.5	18	15.3	13.7	23.2	19.8	18
聚表二元	15.2	12.9	11.8	18.7	16	14.1	25	20.8	18.4
强碱三元	9.8	7.7	6.5	12.4	9.6	8.2	15.5	12.1	9.8
弱碱三元	7.8	6.4	5.1	9.5	7.8	6.2	10.9	9.0	7.0

留黏度最大,聚合物溶液和弱碱三元复合体系次之,强碱三元复合体系最小。

## 2.2 聚合物分子聚集体尺寸 $D_h$

1) 驱油体系类型和聚合物相对分子质量对驱油体系中聚合物  $D_h$  的影响

采用清水配制  $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$  聚合物溶液(聚表二元体系同时加入  $3\ 000\ \text{mg/L}$  表面活性剂,三元复合体系同时加入  $3\ 000\ \text{mg/L}$  表面活性剂和  $12\ 000\ \text{mg/L}$  碱),然后用污水稀释至  $C_p=100\ \text{mg/L}$ (聚表二元体系中表面活性剂浓度  $C_s=300\ \text{mg/L}$ ,三元复合体系中  $C_s=300\ \text{mg/L}$  和碱浓度  $C_A=1\ 200\ \text{mg/L}$ )。四种驱油体系中聚合物分子聚集体尺寸  $D_h$  测试结果见表3。

表3 驱油体系类型和聚合物相对分子质量对驱油体系中聚合物  $D_h$  的影响结果

Table 3 Influence of flooding type and molecular weight on polymer  $D_h$  in flooding systems

nm

驱油体系	聚合物不同相对分子质量的 $D_h$				
	$400\times 10^4$	$800\times 10^4$	$1\ 200\times 10^4$	$1\ 900\times 10^4$	$2\ 500\times 10^4$
聚合物溶液	173.6	191.6	209.6	223.1	260.7
聚表二元体系	213.6	231.6	242.1	250.8	279.1
强碱三元复合体系	153.0	167.1	176.4	180.8	223.3
弱碱三元复合体系	159.2	176.2	191.5	203.1	243.6

从表3中可以看出:①在相同条件下,随聚合物相对分子量增加,聚合物分子聚集体尺寸逐渐增加;②在相同条件下,聚合物在分子聚集体尺寸二元复合体系中最大,其次是聚合物溶液体系,再次是弱碱三元复合体系,最小的是强碱三元复合体系。对于二元体系来说,据Shirahama等<sup>[13-14]</sup>提出的串珠模型理论,当聚合物溶液中加入非离子型表面活性剂时,表面活性剂分子会以类似于胶束聚集体形式吸附(结合)在聚合物分子链上,形成“表面活性剂—聚合物”络合物,随表面活性剂分子浓度的增加,这种络合物分子尺寸逐渐变大。对于三元复合体系来说,HPAM带有负电荷,阴离子表面活性剂和无机电解质阴离子也带有负电荷,同性相斥。因此,对HPAM的分子聚集体尺寸影响较小,但受阳离子的影响较大<sup>[15]</sup>,且阳离子浓度越高,HPAM分子聚集体尺寸越小。与弱碱三元复合体系相比,强碱三元复合体系中的阳离子( $\text{Na}^+$ )浓度更高,分子聚集体尺寸更小。

2) 剪切强度对驱油体系中聚合物  $D_h$  的影响  
 采用清水配制  $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$  聚合物溶液(聚表二元体系同时加入  $3\ 000\ \text{mg/L}$  表面活性剂,三元复合体系同时加入  $3\ 000\ \text{mg/L}$  表面活性剂和  $12\ 000\ \text{mg/L}$  碱),采用 warning 搅拌器对其进行剪切作用(黏度损

失分别为  $15\%(2\ \text{s})$ ,  $30\%(4\ \text{s})$  和  $45\%(10\ \text{s})$ ),然后用污水稀释至  $C_p=100\ \text{mg/L}$ (聚表二元体系中  $C_s=300\ \text{mg/L}$ ,三元复合体系中  $C_s=300\ \text{mg/L}$  和  $C_A=1\ 200\ \text{mg/L}$ ),四种驱油体系中聚合物分子聚集体尺寸  $D_h$  测试结果见表4。

表4 剪切强度对驱油体系中聚合物  $D_h$  的影响  
 Table 4 Influence of shear strength on polymer  $D_h$  in flooding systems

驱油体系	不同聚合物相对分子质量的 $D_h$											
	$1\ 200 \times 10^4$				$1\ 900 \times 10^4$				$2\ 500 \times 10^4$			
	黏损0	黏损15%	黏损30%	黏损45%	黏损0	黏损15%	黏损30%	黏损45%	黏损0	黏损15%	黏损30%	黏损45%
聚合物溶液	209.6	179.5	162.4	185.4	223.1	189.3	178.3	200.1	260.7	221.7	217.1	233.8
聚表二元	242.1	209.5	218.3	222.7	262.4	230.7	237.8	241.5	279.1	232.3	257.6	266.8
强碱三元	176.4	189.2	169.3	163.6	180.8	196.4	174.7	172.4	203.3	213.7	197.8	197.5

从表4可以看出,在聚合物溶液和聚表二元体系中,HPAM的分子聚集体尺寸先降低后升高。这是因为聚合物分子受到剪切后,首先发生解缠绕作用从而使分子聚集体尺寸下降,剪切强度继续增加,HPAM分子发生定向排列<sup>[6]</sup>,从而使分子聚集体尺寸略有增加。在“碱/表面活性剂/聚合物”三元复合体系中,随剪切强度增加,聚合物分子聚集体尺寸  $D_h$  呈现出先升高后降低的变化趋势。这是由于加入碱之后,聚合物分子链解缠绕并发生蜷曲,分子聚集体尺寸变小,当剪切强度较小时,剪切作用导致聚合物分子链略微舒展和定向排列,分子聚集体尺寸变大。但当剪切强度继续增加时,聚合物分子链发生断裂,分子聚集体尺寸减小。

体系同时加入  $3\ 000\ \text{mg/L}$  表面活性剂和  $12\ 000\ \text{mg/L}$  碱),然后用污水稀释至  $C_p=100\ \text{mg/L}$ (聚表二元体系中  $C_s=300\ \text{mg/L}$ ,三元复合体系中  $C_s=300\ \text{mg/L}$  和  $C_A=1\ 200\ \text{mg/L}$ ),四种驱油体系中聚合物分子聚集体形态电镜观测结果见图1。

从图1中可以看出,表面活性剂DWS的加入使聚合物分子聚集体形态由较为疏松的空间网络结构变得更加复杂,这主要是因为表面活性剂DWS会以胶束聚集体形式吸附(结合)在聚合物分子链上,形成“表面活性剂—聚合物”络合物<sup>[3]</sup>,从而使网络结构更加复杂。在强碱三元复合体系和弱碱三元复合体系中,由于溶液中阳离子压缩聚合物分子的扩散双电层,并会对聚合物分子上的阴离子间的静电斥力起屏蔽作用<sup>[17-18]</sup>,从而使聚合物分子更加卷曲,导致聚合物分子缠绕程度下降。强碱三元复合体系中阳离子浓度更高,因此,聚合物分子缠绕程度下降更严重。

2.3 聚合物分子聚集体形态

1) 驱油体系类型对聚合物分子聚集体形态的影响

采用清水配制  $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$  聚合物溶液(聚表二元体系同时加入  $3\ 000\ \text{mg/L}$  表面活性剂,三元复合

2) 剪切强度对聚合物溶液中聚合物分子聚集体形态的影响

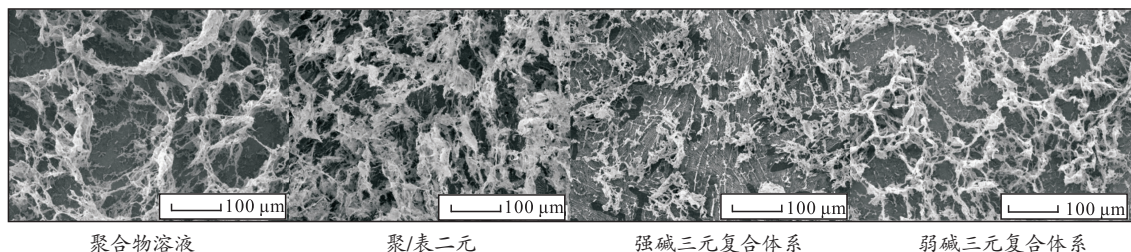


图1 驱油体系类型对聚合物分子聚集体形态的影响SEM图  
 Fig. 1 SEM image of influence of flooding type on polymer molecular configuration

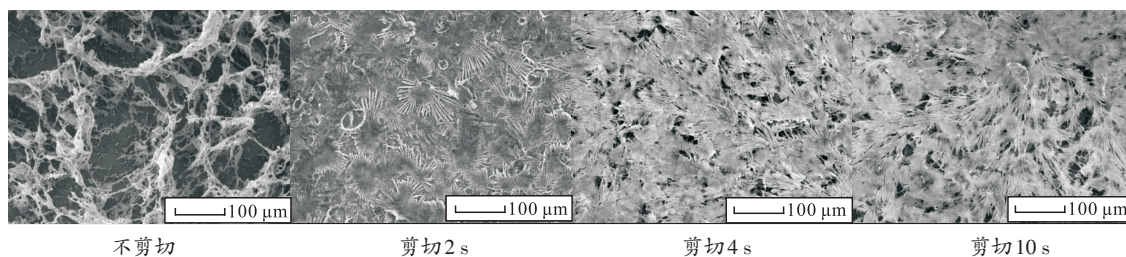


图2 剪切强度对聚合物溶液中聚合物分子聚集体形态影响的SEM图

Fig. 2 SEM image of influence of shear strength on polymer molecular configuration

采用清水配制  $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$  聚合物溶液,采用 warning 搅拌器对其进行剪切作用(黏度损失分别为 15%(2 s), 30%(4 s)和 45%(10 s)),然后用污水稀释至  $C_p=100\ \text{mg/L}$ ,剪切作用对聚合物溶液分子聚集体形态影响电镜观测结果见图2。

从图2可以看出,剪切作用对聚合物溶液中聚合物分子聚集体形态存在影响。根据 Stern-Grahame 扩散双电层模型理论<sup>[10]</sup>,当聚合物分子受到溶液中阳离子影响后倾向于卷曲和收缩构象,因此,在未剪切的聚合物溶液中聚合物分子处于卷曲和收缩状态,形成无规网状结构,当剪切强度较小时,剪切强度还不足以破坏聚合物分子链,此时会使聚合物分子发生解缠绕作用,且有少量聚合物分子发生定向排列,从而使黏度下降,分子聚集体尺寸下降。随着剪切强度的增加,聚合分子大多数发生定向排列,从而使得聚合物溶液黏度降低,聚合物分子聚集体尺寸增加,且剪切强度愈大,聚合物分子定向排列的趋势愈明显,从而使黏度降低的愈多,分子聚集体尺寸愈大<sup>[17]</sup>。

## 2.4 渗透率极限

渗透率极限是指驱油体系通过岩心不发生堵塞的最低渗透率值,通常可以通过岩心驱替实验过程

中压力升高趋势来确定。实验表明,对于某一驱油体系(聚合物相对分子质量和药剂浓度固定),随注入量增加,注入压力升高。如果注入压力升高到一定程度后不再增加即出现水平段,说明岩心注入量等于采出量,即达到了注采平衡,能达到注采平衡的最低岩心渗透率,即为渗透率极限。

1) 驱油体系类型和聚合物相对分子质量对驱油体系渗透率极限的影响

聚合物溶液压力梯度( $P_c$ )和后续水压力梯度( $P_w$ )测试结果见表5。注入压力与注入孔隙(PV)倍

表5 聚合物溶液的化学驱压力梯度和后续水压力梯度 ( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

Table 5 Chemical flooding pressure gradient and subsequent water pressure gradient in polymer ( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

聚合物相对分子质量	工作黏度/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	$P_c$ / ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$P_w$ / ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$400\times 10^4$ (P1)	3.0	25	12.2	9.2
		40	6.7	4.0
$800\times 10^4$ (P2)	8.1	40	9.2	7.2
		60	5.3	3.2
$1\ 200\times 10^4$ (P3)	11.5	60	7.7	5.5
		80	4.6	2.9

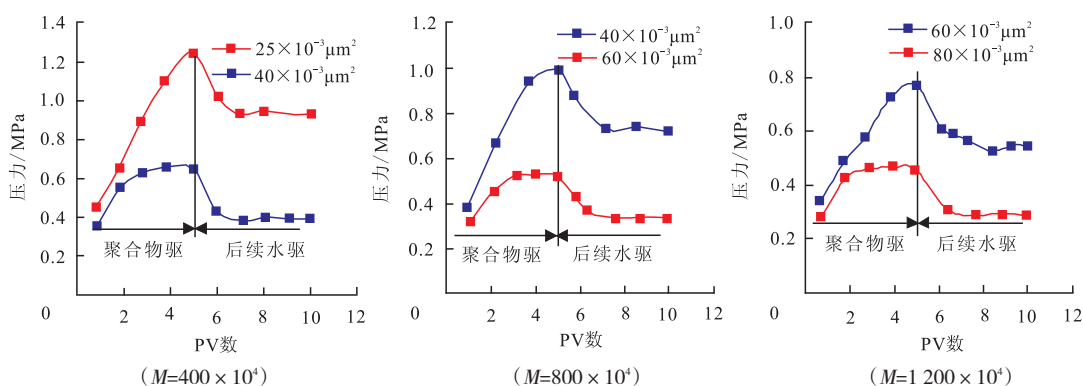


图3 注入压力与PV数关系

Fig. 3 Relation between injection pressure and pore volume

数关系见图3。

从表5可以看出,相同渗透率条件下,随聚合物相对分子质量的增加,化学驱压力梯度和后续水压力梯度逐渐增加。从图3可以看出,随岩心渗透率减小和聚合物相对分子质量增加,注入压力升高。通过曲线分析,相对分子质量为 $400 \times 10^4$ 、 $800 \times 10^4$ 和 $1\,200 \times 10^4$ 聚合物对应岩心渗透率界限分别为 $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。同样方法可以得到不同相对分子质量和剪切强度的聚合物溶液、聚表二元、强碱三元和弱碱三元的渗透率极限、化学驱压力梯度( $P_c$ )和后续水压力梯度( $P_w$ )测试结果,见表6。

随着聚合物相对分子质量的增加,驱油体系的渗透率极限逐渐增加。在聚合物相对分子质量和聚合物浓度都相同条件下,渗透率极限顺序是:聚表二元体系>强碱三元复合体系>聚合物溶液>弱碱三元复合体系。这是因为,虽然相同条件下,强碱三元复合体系的黏度和分子聚集尺寸明显小于相同条件下的聚合物溶液的,但强碱三元复合体系在驱替过程中体系中的NaOH会与岩石中的成分发生反应<sup>[18]</sup>,从而产生沉淀堵塞孔道,导致注入压力升高。胡淑琼<sup>[19]</sup>等研究表明,强碱三元复合体系采出液中硅离子浓度较高,说明强碱体系在驱替过程中NaOH会与岩石中的硅酸盐反应,从而形成大量硅酸垢堵塞岩石孔隙。另外,碱与岩石作用后还会导致颗粒运移,运移的颗粒堵塞孔喉从而使注入压力升高<sup>[20]</sup>。

2) 碱与储层矿物作用的影响

碱液通过天然岩心后压力梯度( $P_A$ )和后续水压力梯度( $P_w$ )见表7。

从表7中可以看出,在岩心渗透率相近条件下,强碱碱水驱压力梯度和后续水压力梯度较大,弱碱的较小。进一步分析可知,碱可以溶蚀部分岩石矿物成分,反应生成物与二价阳离子反应形成水不溶物,即 $\text{Na}^+$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 交换反应形成沉淀物。沉淀物会减小孔隙过流断面,增加流动阻力,表现为渗透率下降,碱水驱压力梯度和后续水压力梯度增加。与强碱相比较,弱碱与岩石矿物组成几乎不发生化学反应。

在碱液注入和后续水驱过程中,注入压力与PV数关系见图4。

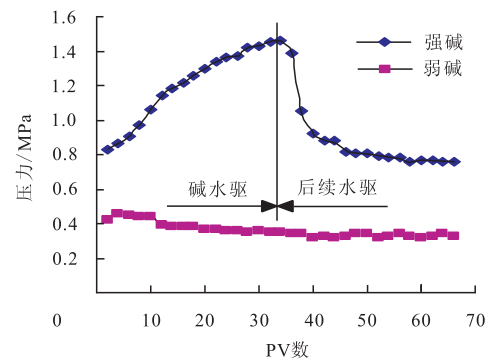


图4 压力与PV数关系

Fig. 4 Relation between pressure and pore volume

表6 渗透率极限、化学驱压力梯度和后续水压力梯度 ( $C_p=1\,000\text{ mg/L}$ )

Table 6 Permeability limit, Chemical flooding pressure gradient and subsequent water pressure gradient ( $C_p=1\,000\text{ mg/L}$ )

聚合物 相对分子 质量	聚合物溶液			聚表二元			强碱三元			弱碱三元		
	渗透率 极限/ $10^{-3}\text{mm}^2$	$P_c$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$P_w$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	渗透率 极限/ $10^{-3}\text{mm}^2$	$P_c$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$P_w$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	渗透率 极限/ $10^{-3}\text{mm}^2$	$P_c$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$P_w$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	渗透率 极限/ $10^{-3}\text{mm}^2$	$P_c$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$P_w$ / $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
$400 \times 10^4$	40	6.7	4	50	6.1	3.9	45	14.1	9.1	30	7.9	4.7
$800 \times 10^4$	60	5.3	3.2	80	4.6	2.6	70	11.1	6.7	50	5.8	3.6
$1\,200 \times 10^4$	80	4.6	2.9	100	4	2.4	90	8.5	5.4	70	5.1	2.8
$1\,900 \times 10^4$	95	4.3	2.6	120	3.7	2.2	100	7.8	4.7	85	4.4	2.4
$2\,500 \times 10^4$	110	4.1	2.4	135	3.5	2.1	125	7.3	4.2	100	4.2	2.2

注:二元界面张力 $(4.41 \sim 7.74) \times 10^{-2}$ ,强碱三元界面张力 $(5.44 \sim 7.68) \times 10^{-3}$ ,弱碱三元的界面张力 $(2.98 \sim 3.96) \times 10^{-3}$ 。

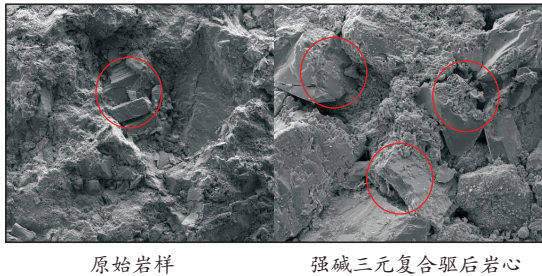
表7 碱水驱压力梯度和后续水压力梯度

Table 7 Alkaline water flooding pressure gradient and subsequent water pressure gradient

碱液类型	井号	取心深度/ m	岩心渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	碱浓度, %	碱水驱压力梯度/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	后续水驱压力梯度/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
强碱 NaOH	检336	982.49	15	1.2	29.2	15.2
弱碱 $\text{Na}_2\text{CO}_3$	检336	983.15	17	1.2	7.0	6.4

从图4可以看出,与弱碱液相比较,强碱液注入压力较高。由此可见,强碱可以与岩石中矿物成分发生反应,反应生成物造成孔隙过流断面减小,流动阻力增加。与强碱相比较,弱碱几乎不与岩石中矿物组成反应。因此,弱碱三元复合体系的渗透率极限最小,而强碱三元复合体系的渗透率极限要大于相同条件下的聚合物溶液的渗透率极限。

水驱结束和强碱三元复合驱结束的岩心电镜照片见图5。



原始岩样 强碱三元复合驱后岩心

图5 扫描电镜照片

Fig. 5 SEM images

从图5中可以看出,经强碱三元复合驱后,岩石骨架中的长石发生了明显的溶蚀。溶蚀部分与地层水接触后pH降低,当 $pH < 11$ 时,流体中的硅酸盐会大量变成硅酸垢析出从而堵塞岩心孔道<sup>[21]</sup>,且碱蚀还会造成岩心颗粒运移堵塞岩心孔道,从而使岩心注入压力升高。宋考平<sup>[22]</sup>等研究同样表明,强碱三元复合驱后颗粒边界经过强碱溶蚀呈“锯齿状”,石英、长石和黏土矿物均发生不同程度溶蚀,同时结垢还造

成孔隙结构发生变化,部分孔隙阻塞,使强碱三元复合驱后岩心喉道半径较水驱岩心下降6.528%,孔隙半径下降3.360%。因此,强碱三元复合体系的黏度和分子聚集体尺寸虽然较小,但岩心渗透率极限会明显大于相同聚合物浓度的岩心渗透率极限。

### 3) 剪切作用对驱油体系渗透率极限的影响

驱油体系渗透率极限、化学驱压力梯度( $P_c$ )和后续水压力梯度( $P_w$ )测试结果见表8。

从表8可以看出,在相同聚合物相对分子质量条件下,随着剪切强度的增加,聚合物溶液、聚表二元和强碱三元复合体系的渗透率极限均逐渐下降。这与聚合溶液的黏度随剪切强度的增加而下降相符,但与聚合物溶液的分子聚集体尺寸变化不太相符,这也说明,驱油体系在受到剪切后,首先发生的是解缠绕,然后聚合物分子发生定向排列,而不是发生了断链。

### 4) 天然与人造岩心实验结果对比

从压汞实验可得萨中天然岩心和人造岩心的岩心渗透率与孔喉半径中值关系(图6)。

从图6可以看出,相同孔喉半径中值条件下天然岩心渗透率较大。通过拟合可得岩心渗透率( $Y$ )与喉道半径( $X$ )的关系式为:

$$\text{人造岩心: } Y = 14.002 X^{1.9055} \quad (1)$$

$$\text{天然岩心: } Y = 19.982 X^{1.8271} \quad (2)$$

通过公式(1)和公式(2)可以近似计算出天然岩心的相应渗透率极限。

表8 渗透率极限、化学驱压力梯度和后续水压力梯度( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

Table 8 Permeability limit, chemical flooding pressure gradient and subsequent water pressure gradient ( $C_p=1\ 000\ \text{mg/L}$ )

聚合物相对分子质量	黏损, %	聚合物溶液			聚表二元			强碱三元		
		渗透率极限/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$	$P_f$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$P_w$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	渗透率极限/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$	$P_f$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$P_w$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	渗透率极限/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$	$P_f$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$P_w$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ )
1 200×10 <sup>4</sup>	15	140	3.7	2.2	180	3.4	1.9	160	6.9	4
	30	105	4.1	2.6	130	3.7	2.1	120	7.6	4.6
	45	80	4.6	2.9	100	4	2.4	90	8.5	5.4
1 900×10 <sup>4</sup>	15	200	3.7	2	220	3.1	1.8	210	6.3	4
	30	140	4.1	2.3	160	3.4	2	150	7.1	4.4
	45	95	4.3	2.6	120	3.7	2.2	100	7.8	4.7
2 500×10 <sup>4</sup>	15	230	3.3	1.9	240	2.8	1.7	235	5.9	3
	30	160	3.7	2.1	180	3.2	1.9	170	6.8	3.7
	45	110	4.1	2.4	135	3.5	2.1	125	7.3	4.2

注:二元界面张力(4.26~5.87)×10<sup>-2</sup>,强碱三元界面张力(4.74~6.85)×10<sup>-3</sup>。

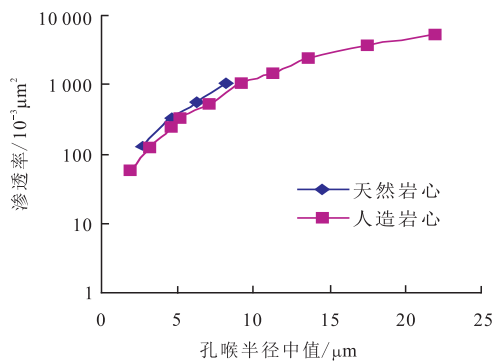


图6 岩心渗透率与孔喉半径中值关系

Fig. 6 Relation between core permeability and median pore throat radius

### 3 机理分析

根据“架桥”原理<sup>[21]</sup>,对岩石孔喉形成较稳定堵塞的聚合物分子水动力学半径( $R_h$ )与岩石孔喉半径( $R$ )的关系为 $R_h > 0.46R$ 。因此,在开展化学驱之前必须对驱油体系与油藏的适应性进行研究,才能保证驱油体系能进入油藏深部,且具有良好的调驱效果。各体系中起到调驱作用的主要是聚合物溶液在岩心中流动时,会在多孔介质中发生吸附捕集,在高

浓度的聚合物溶液中,由于聚合物分子之间的相互缠绕程度较强,导致聚合物分子聚集尺寸 $D_n$ 较大,因此,只能进入渗透率较高的岩心,相应的平均喉道半径较大,才不会在岩心孔喉处发生捕集,从而能够顺利的通过孔喉,起到良好的调剖调驱的作用(图7a);当高浓度聚合物溶液进入渗透率较低岩心时(图7b),由于喉道半径较小,聚合物分子会在孔喉处发生捕集,难以进入油藏深部,甚至会在岩心端面发生堵塞,从而起不到良好的深部液流转向效果;对于低浓度的聚合物溶液,由于聚合物分子间相互缠绕程度较弱,导致聚合物分子线团 $D_n$ 较小,因此不会在高渗层发生捕集,仅有一定量的吸附作用,但当聚合浓度太低时,将难以在高渗层中形成有效的渗流阻力(图7(c)),因此难以起到较好的液流转向效果。因此在选择驱油体系时,只有当驱油体系既能在多孔介质中形成有效的渗流阻力,又不堵塞地层,才能起到良好的驱油效果。另外,当驱油体系受到剪切后,由于聚合物分子为线性结构,因此聚合物分子首先会发生解缠绕和定向排列,从而使驱油体系中聚合物分子聚集尺寸略有下降或者稍有增加,但会使驱油体系的岩心渗透率极限明显增加(图7(e)和图7(f))。

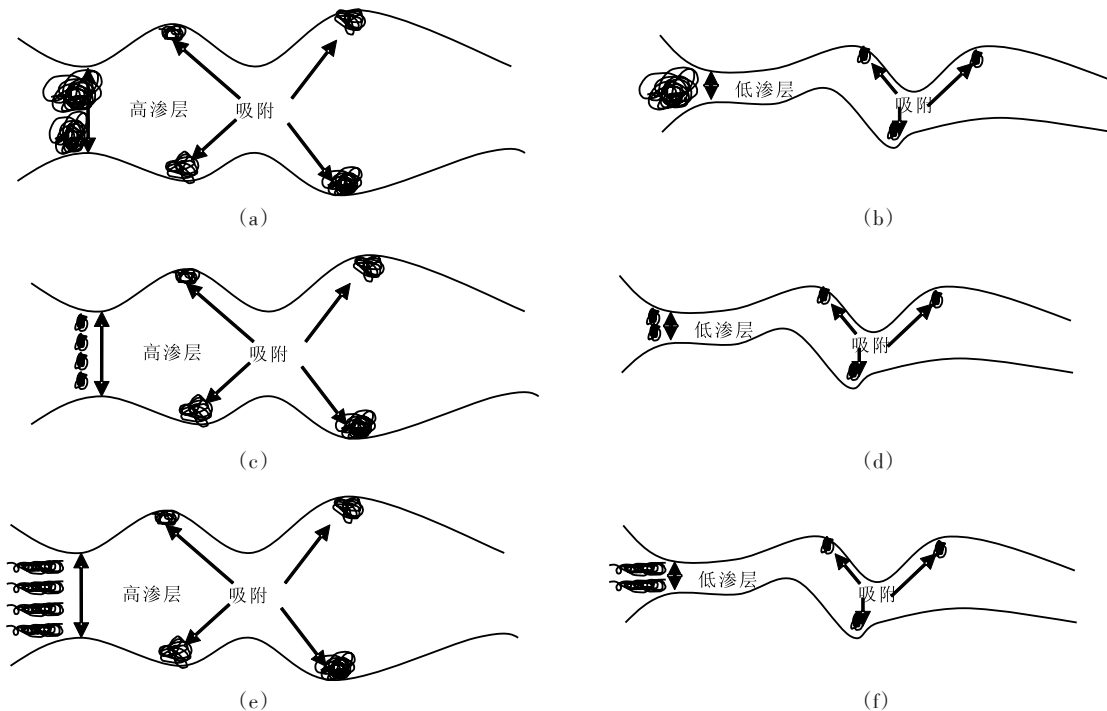


图7 聚合物分子在孔隙中吸附捕集示意图

Fig. 7 Schematic diagram of polymer molecular adsorption in pore

## 4 结论

1) 驱油体系中聚合物分子链受到剪切作用初期先发生解缠绕,之后聚合物分子发生定向排列,表现为视黏度下降,聚合物分子聚集体尺寸呈现“先降后升”变化趋势。

2) 四种驱油体系黏度和分子聚集体尺寸大小顺序是:聚表二元>聚合物溶液>弱碱三元>强碱二元。四种驱油体系渗透率极限大小顺序是:聚表二元>强碱三元>聚合物溶液>弱碱三元。

3) 在聚表二元体系中非离子表面活性剂会在聚合物链上吸附从而使聚合物分子聚集体尺寸略有增大,渗透率极限略有增加;而三元复合体系中,碱的加入会增加溶液中阳离子浓度,从而使体系中聚合物分子聚集体尺寸减小,进而影响三元复合体系的渗透率极限。

4) 强碱三元复合体系与岩心中矿物发生作用,引起碱耗和pH降低,这导致溶液中部分溶解物质发生沉淀,堵塞岩石喉道。溶蚀作用还会引起岩石骨架颗粒发生运移和堵塞孔道,从而造成注入压力升高。

### 参考文献

- [1] 何江川,廖广志,王正茂. 油田开发战略与接替技术[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 519-524.
- [2] 徐正顺,张居和,冯子辉,等. 大庆油田水驱及聚合物驱油藏剩余油黏度特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(12): 1709-1720.
- [3] 朱友益,侯庆锋,简国庆,等. 化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 90-96.
- [4] 李鹏华,李兆敏,赵金省,等. 多段塞平行聚能提高聚合物驱后采收率实验研究[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 110-113.
- [5] 陈广宇,田燕春,赵新,等. 大庆油田二类油层复合驱注入方式优化[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 459-464.
- [6] 许园,叶仲斌,陈洪,等. 驱替液黏度对多层非均质油藏聚驱吸液剖面反转及驱油效果影响[J]. 油田化学, 2014, 31(4): 549-554.
- [7] 卢祥国,高振环,闫文华. 人造岩心渗透率影响因素试验研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1994, 13(4): 53-55.
- [8] 卢祥国,宋合龙,王景盛,等. 石英砂环氧树脂胶结非均质模型制作方法:中国, ZL200510063665.8[P]. 2005-09-07.
- [9] Lu Xiangguo, Wang Xiaoyan, Jiang Weidong. Experimental study on the molecular dimension and configuration of polymer and its flow characteristics from electrolyte effect[J]. Chinese Journal of Chemistry, 2009, 27(4): 839-845.
- [10] 李美蓉,柳智,宋新旺,等. 金属阳离子对聚丙烯酰胺溶液黏度的影响及其降黏机理研究[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(1): 43-48.
- [11] 康万利,孟令伟,牛井岗,等. 矿化度影响HPAM溶液黏度机理[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(5): 175-177.
- [12] Liu Jinxiang, Lu Xiangguo, Sui Shilei. Evaluation, synthesis and gelation mechanism of organic chromium[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124(5): 3669-3677.
- [13] Shirahama K, Tsujii K, Takagi T. Free-boundary electrophoresis of sodium dodecyl sulfate-protein polypeptide complexes with special reference to SDS-polyacrylamide gel electrophoresis[J]. Journal of Biochemistry, 1974, 75(2), 309-319.
- [14] 王晓燕,卢祥国,姜维东. 正负离子和表面活性剂对水解聚丙烯酰胺分子线团尺寸的影响及其作用机理[J]. 高分子学报, 2009, (12): 1259-1265.
- [15] H K Van Poolen. Fundamentals of enhanced oil recovery[M]. Tulsa, Oklahoma, Penn Well Books, Division of Penn Well Publishing Company, 1981: 34-36.
- [16] 刘进祥,卢祥国,刘敬发,等. 交联聚合物溶液在岩心内成胶效果及机理[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 474-480.
- [17] 刘进祥,卢祥国,李国桥,等. 特高矿化度  $Cr^{3+}$  交联聚合物溶液渗流特性及其机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(6): 145-152.
- [18] 卢祥国,谢坤,曹豹,等.  $Cr^{3+}$  聚合物凝胶成胶效果及其影响因素研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(3): 170-176.
- [19] 胡淑琼,李雪,卢祥国,等. 三元复合驱对储层伤害及其作用机理研究油田化学[J]. 油田化学, 2013, 30(4): 575-580.
- [20] 王磊. 碱与储层矿物作用及其对驱油剂渗流特性的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(4): 129-133.
- [21] 刘东升,李金玲,李天德,等. 强碱三元复合驱硅结垢特点及防垢措施研究[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 139-141.
- [22] 宋考平,何金钢,杨晶. 强碱三元复合驱对储层孔隙结构影响研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 164-172.
- [23] 朱怀江,刘强,沈平平,等. 聚合物分子尺寸与油藏孔喉的配伍性[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 609-613.

(编辑 尹淑容)