

聚合物驱有效流度控制时间范围及其影响因素研究

施雷庭¹, 朱诗杰¹, 邹剑², 薛新生³, 赵文森³, 叶仲斌¹

(1. 西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 中海石油天津分公司, 天津 300459;
3. 中海石油研究总院海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100027)

摘要: 研究聚合物驱有效控制时间范围及其影响因素, 有利于聚合物驱后进一步提高采收率措施的开展。结合水驱油藏的特征曲线理论和聚合物驱流度控制作用机理建立了判断方法, 并通过室内驱油实验进行了影响因素的分析。结果表明, 聚驱前后的水驱特征曲线存在一定的差异。随着后续水驱过程的进行, 其水驱规律会逐渐回归到聚合物驱前的原有规律, 将聚合物驱前后水驱特征曲线规律的一致性作为判断聚合物驱有效流度控制范围的方法是可行的。增加聚合物溶液黏度对其流度控制时间的影响相对较小, 仅有 10^{-2} 数量级注入PV量的影响; 增加残余阻力系数能大幅度延长聚合物驱的有效流度控制时间, 达到 10^{-1} 数量级注入PV量的影响。聚合物的残余阻力系数是影响有效流度控制时间范围的主要因素。

关键词: 聚合物驱; 流度控制; 水驱特征曲线; 溶液黏度; 残余阻力系数

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Study on effective mobility control time range and influencing factors of polymer flooding

SHI Leiting¹, ZHU Shijie¹, ZOU Jian², XUE Xinsheng³, ZHAO Wensen³, YE Zhongbin¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir and Exploitation Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Tianjin Branch, CNOOC(China) Co., Ltd., Tianjin 300459, China; 3. State Key Laboratory for Efficient Development of Offshore Oil Exploitation, CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: The study on the effective control time range of polymer flooding and its influencing factors is conducive to the further development of oil recovery measures after polymer flooding. Based on the theory of characteristic curve of water flooding reservoir and the mobility controlling mechanism of polymer flooding, a judgment method was established, and the influencing factors were analyzed through the indoor flooding experiments. The results showed that there were some differences in the water flooding characteristic curves before and after polymer flooding. With the follow-up process of water flooding, its rule would gradually return to the original rule before polymer flooding. It was feasible to judge the effective mobility control range of polymer flooding by the consistency of the characteristic curve of water flooding before and after polymer flooding. The effect of increasing the viscosity of polymer solution on its mobility control time was relatively small, only 10^{-2} order of magnitude of PV injection. Increasing the residual resistance factor (RRF) could significantly prolong the effective mobility control time of polymer flooding, and reached 10^{-1} order of magnitude of PV injection. The residual resistance coefficient of polymer is the main factor affecting the effective mobility control time.

Key words: polymer flooding, mobility control, characteristic curve of water flooding, solution viscosity, residual resistance factor

聚合物驱作为改性水驱技术, 通常应用于在水驱油藏中提高采收率, 其作用原理是通过增加驱替相的溶液黏度, 降低驱替相的相对渗透率, 达到改善不利油水流度比的目的。对于聚合物驱过程的认识, 早期认识是指注入聚合物的过程^[1], 但是聚合物

在多孔介质中吸附滞留、改善水相渗透率的作用特征, 使一定时间范围内的后续水驱注入水依然受到聚物流度控制作用的影响^[2], 所以认为聚合物驱流度控制作用时间范围应该是包括聚合物的注入过程和受其流度控制作用影响的后续水驱过程两部分。

收稿日期: 2018-12-18。

第一作者简介: 施雷庭(1976—), 男, 副教授, 化学驱提高采收率技术与教学。通讯地址: 四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学, 邮政编码: 610500。E-mail: slting@swpu.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项“海上油田化学驱油技术”(2016ZX05025-003)。

聚合物的注入过程是具有流度控制影响作用的^[3],但是聚合物驱流度控制作用影响的后续水驱时间范围却鲜有研究,而目前的研究热点是聚合物驱后何时开展二元复合驱^[4-6]、三元复合驱等提高采收率技术^[7]。主要技术手段是通过驱油实验或数值模拟来研究聚合物驱后不同时机下的驱油效果^[8-9],然而不同的实验条件对结果有着不同的影响。为克服实验或模拟条件对结果的影响,需要一种判断方法来确定聚合物的有效流度控制时间范围,以判断后续技术的开展。其中最重要的一点就是聚合物驱后受聚合物流度控制能力影响的后续水驱时间范围。

因此,将聚合物驱后的后续水驱特征曲线变化与聚合物驱前的水驱过程特征对比,进行聚合物有效流度控制的后续水驱时间判断;再引入描述多孔介质中聚合物渗流特征的2个无因次参数阻力系数和残余阻力系数作为变量研究其对聚合物有效流度时间范围的影响^[10-11],以确定聚合物驱有效流度控制时间范围的主要影响因素,以便于指导聚合物驱技术和后续提高采收率技术的开展应用。

1 基本原理

聚合物驱作为改性水驱技术进行流度控制的主要表征手段就是含水率变化曲线,而含水率下降漏斗就是聚合物驱过程的变化特征。

后续水驱过程中,聚合物在多孔介质中的吸附滞留作用(即残余阻力系数)降低了储层渗透率,延长了其有效流度控制时间,但是有限的吸附滞留在后续水驱的冲刷过程中会逐渐失效^[12],导致含水率变化回归到水驱过程的特征曲线。

我国通过大量的注水油田开发,累积了不少关系的水驱特征曲线^[13-14],现在多采用微分变换,将累积产油量 N_p 、累积产水量 W_p 、累积产液量 L_p ,甚至累积注水量之间的关系,转化成含水率 f_w 与采出程度 R 的关系^[15],如凸型曲线的 $R=a+b\ln(1-f_w)$ 、S曲线的 $R=a+b\ln(f_w/(1-f_w))$ 、凹型曲线的 $\ln R=a+b\ln f_w$ 。

因此,聚合物驱前后的水驱特征曲线是否具有-致性是可以判断聚合物有效流度控制范围的。

2 方法步骤

该方法包括如下步骤:①分析目标油藏条件下

的水驱油特征曲线(实验获得或者数值模拟预测),建立注入PV数与含水率(f_w)/采出程度(R)的动态变化关系曲线;②对 f_w-R 曲线中线性关系较好的直线区间进行公式拟合,获得水驱规律的应用公式;③分析聚合物驱过程的动态曲线特征关系(f_w-R)曲线,确定出聚合物驱过程范围和后续水驱开始时间,在后续水驱开始时间到含水率达到95%这个区间内,拟合后续水驱范围的水驱特征公式,不断调整拟合范围的起点;④对比不同起点条件下的后续水驱特征曲线公式,当与水驱特征曲线公式相接近时,认为聚合物驱不再影响后续水驱过程,那么这个范围就是聚合物有效控制的后续水驱范围,加上聚合物驱过程,就是整个聚合物驱的有效流度控制范围。

3 方法判断应用

3.1 实验条件

驱油实验条件是以某稠油油藏聚合物驱的基础设计开展的,相关条件如下:①驱油用实验原油是65℃条件下黏度为70 mPa·s的地面脱气脱水原油;②实验岩心是用 $\phi 25\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 尺寸的填砂管装填酸洗石英砂,填压成平均渗透率为 $2\ 500\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,孔隙度为31%的多孔介质模型;③实验用地层水的总矿化度为9 374 mg/L,离子组成分别是3 091.96 mg/L的 Na^+/K^+ 、276.17 mg/L的 Ca^+ 、158.68 mg/L的 Mg^+ 、14.21 mg/L的 CO_3^{2-} 、311.48 mg/L的 HCO_3^- 、85.29 mg/L的 SO_4^{2-} 、5 436.34 mg/L的 Cl^- ;④实验驱替剂为工业品疏水缔合聚合物AP-P4,地层水配制浓度为1 750 mg/L的溶液,注入段塞为0.3PV;⑤实验步骤是按照《驱油用聚合物溶液性能评价操作规范》进行。在65℃烘箱里,以1 mL/min的驱替流速进行驱替至瞬时含水率95%时,转注0.3PV的聚合物溶液后进入后续水驱,直至瞬时含水率再次达到95%停止实验。

3.2 水驱油特征曲线

通过水驱油实验可以获得不同注入量条件下采出程度和含水率的变化关系,转化成采出程度与含水率的相互关系(图1)。

从图1a水驱油动态曲线可以看出,注水0.2PV左右突破岩心,突破后的产出液含水率快速上升,0.6PV左右进入高含水期,整体采出程度在30%左右。图1b所示的采出程度与含水率曲线的变化关系

属于“凹”型曲线特征。因此,将转化后的 f_w-R 水驱特征曲线,取其线性关系较好的直线区间,应用公式 $\ln R=a+bf_w$ 拟合出公式为 $y=75.431\ln(x)-162.73$,满足水驱特征曲线的S—凸型的曲线关系,且曲线拟合度高达98%。

3.3 聚合物驱油特征曲线

聚合物驱油的实验结果和转化后的 f_w-R 水驱特征曲线如图2所示。

从图2a可知,聚合物的流量控制作用提高了驱油效率和波及效率,出现了“V”型的含水率下降漏斗,而在后续水驱过程中含水率回升迅速,很快进入到高含水期。分析认为0.3PV注入量的聚合物在多孔介质中的吸附滞留有限,在后续水驱冲刷下其流量控制能力下降明显,所以含水率快速上升。因此,对后续水驱不同阶段的曲线拟合,分析聚合物的有效流量控制范围。

首先拟合后续水驱开始的实验数据点到驱替结束点之间的曲线,获得一条 f_w-R 的规律曲线与水驱过程的特征曲线对比,存在差异表明水驱规律不一致;然后选取后续水驱过程第2个实验数据点,拟合

该点到驱替结束点之间的曲线,获得另外一条 f_w-R 的规律曲线,如此步骤下去直至拟合公式与水驱规律较为一致后停止推导,推算过程见表1。

在后续水驱后的第5个实验点(即瞬时含水率达到92.73%时)的水驱曲线规律 $y=72.569\ln(x)-189.91$ 与水驱过程的曲线规律 $y=74.971\ln(x)-170.89$ 达到较高的一致性,而随着注入量的增加,水驱特征会更加接近水驱特征曲线。表明从该时刻起的水驱过程不再受聚合物驱过程的影响,也就是说在该驱油实验的条件下,后续水驱0.27PV后,水驱规律回归到单纯水驱油的特征状态。

通过对图2中聚合物驱前后的驱油效果分析发现,后续水驱的注入量到2.2PV时,单位注入量下的采出程度与纯水驱至高含水阶段后单位注入量下的采出程度达到一致,表明了该阶段的后续水驱不再受聚合物的流量控制影响。

4 流量控制范围的影响因素

聚合物驱过程的流量控制能力不同,对聚合物的含水率变化特征影响是很明显的。虽然聚合物驱

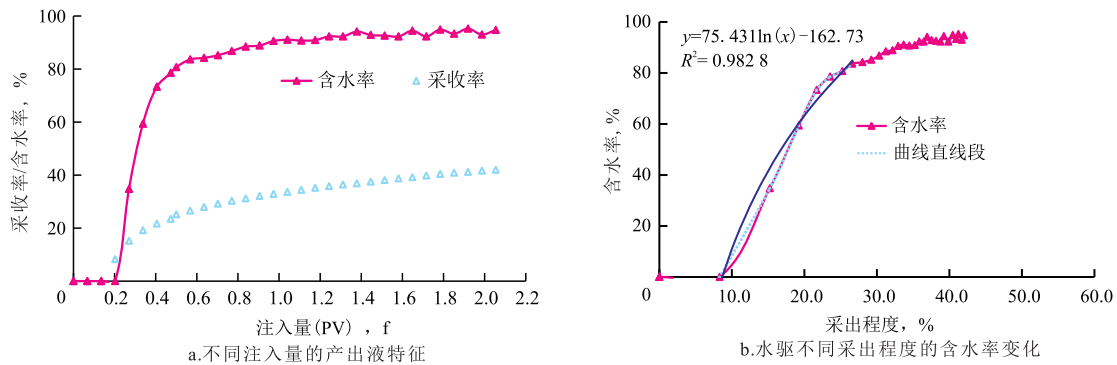


图1 f_w-R 的水驱特征曲线
Fig. 1 Characteristic curves of water flooding of f_w-R

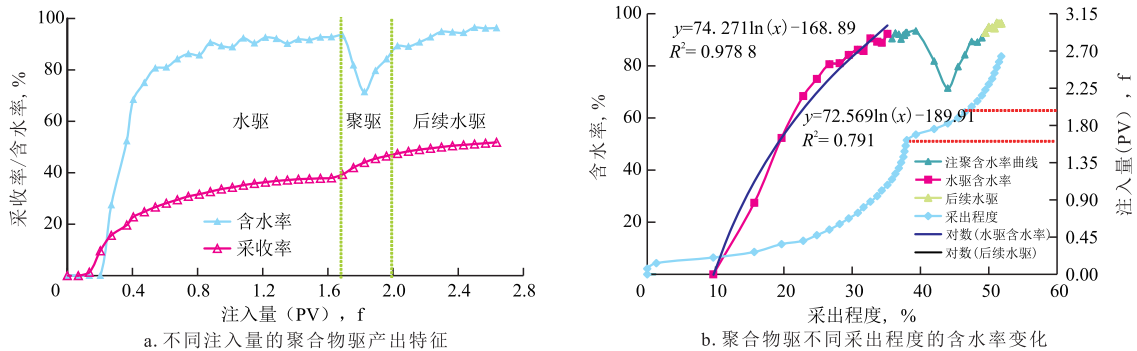


图2 聚合物驱前后的 f_w-R 水驱特征曲线

Fig. 2 Characteristic curves of water flooding of f_w-R before and after polymer flooding

表1 聚合物流度控制时间范围的推算
Table 1 Calculation of control time range of polymer mobility

瞬时含水率, %	后续水驱过程中实验取样点下的采出程度, %				
	第一个点	第二个点	第三个点	第四个点	第五个点
84.21	46.50	—	—	—	—
89.29	47.50	47.50	—	—	—
89.09	48.33	48.33	48.33	—	—
90.74	49.00	49.00	49.00	49.00	—
92.73	49.50	49.50	49.50	49.50	49.50
94.83	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
94.64	50.50	50.50	50.50	50.50	50.50
94.44	50.83	50.83	50.83	50.83	50.83
96.43	51.17	51.17	51.17	51.17	51.17
96.15	51.50	51.50	51.50	51.50	51.50
96.30	51.83	51.83	51.83	51.83	51.83
拟合的曲线公式	$y=108.09\ln(x)-329.5$	$y=95.436\ln(x)-279.88$	$y=104.59\ln(x)-315.8$	$y=92.986\ln(x)-270.22$	$y=72.569\ln(x)-189.91$

流度控制作用的因素很多,但是所有因素均可以归纳到聚合物的阻力系数和残余阻力系数无因次量中^[6]。其中,聚合物驱过程中流度控制可以通过聚合物在多孔介质的中有效黏度与残余阻力系数的乘积来表征。虽然聚合物在多孔介质中的有效黏度是受注入条件、岩心条件等多因素影响的变量,但是在确定的研究条件下其与表观黏度呈现正相关。因此,围绕聚合物驱有效流度控制时间的影响,研究采用了溶液表观黏度和残余阻力系数两个参数进行表征。

在前述实验条件的基础上配制不同溶液性能的聚合物溶液。溶液黏度差异是配制不同浓度的聚丙烯酰胺溶液^[6],不同残余阻力系数是通过复配不同吸附能力的缔合聚合物溶液。首先通过测定不同类型聚合物的残余阻力系数,然后再以此按一定比例复配,测定其残余阻力系数,得到目标体系。在65℃条件下采用布氏黏度计测定了溶液黏度,通过渗流特征实验确定了体系的残余阻力系数(聚驱前后的渗透率比值),驱油体系的相关参数见表2。

表2 聚合物溶液的性能参数

Table 2 Performance parameters of polymer solution

体系	不同黏度的体系			体系	不同残余阻力系数的体系		
	黏度/ (mPa·s)	阻力 系数	残余阻 力系数		黏度/ (mPa·s)	阻力系 数	残余阻 力系数
H ₁	10.1	30.0	5.8	H ₁	10.1	30.0	5.8
H ₂	18.5	43.5	6.4	M ₂	8.8	71.4	21.3
H ₃	32.2	60.0	6.9	HM ₃	9.2	112.5	28.1

4.1 溶液表观黏度的影响

通过驱油实验获得不同黏度体系的驱油效果。从图3a可以看出,聚合物溶液的黏度越高,出现的含

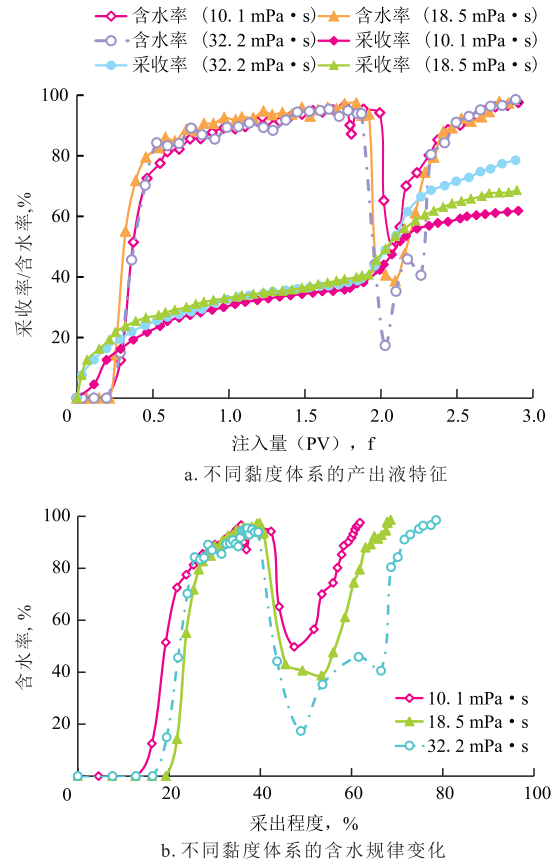


图3 不同黏度体系的驱油特征曲线
Fig. 3 Displacement characteristic curves of different viscosity systems

水下降漏斗越大,原油采收率的增幅越高。通过图3b计算获得水驱曲线特征公式及有效流度控制范围(表3)。

从表3可知,不同黏度体系的聚合物的有效流度控制范围相差并不明显,分别是注入量0.323PV、

表3 不同黏度条件下的有效流度控制时间范围
Table 3 Effective mobility control time range of different viscosity

体系	水驱特征曲线	后续水驱特征曲线	驱替范围值
H ₁	$y=206.84\ln(x)-562.93$ $R^2=0.9955$	$y=206.11\ln(x)-751.69$ $R^2=0.9717$	0~0.323PV
H ₂	$y=260.31\ln(x)-775$ $R^2=0.9605$	$y=254.4\ln(x)-972.14$ $R^2=0.9441$	0~0.318PV
H ₃	$y=255.96\ln(x)-744.75$ $R^2=0.9987$	$y=253.26\ln(x)-999.44$ $R^2=0.7907$	0~0.329PV

0.318PV、0.329PV。聚合物驱注入段塞0.3PV,那么后续水驱的影响范围是注入量0.02~0.03PV,可见提高溶液黏度对后续水驱流度控制时间范围是不明显的。分析认为聚合物溶液黏度增加后的流度控制作用主要应用在注聚阶段,通过提高驱替相黏度以改善油/水流度比、提高波及效率。而其吸附滞留对降低水相渗透率的能力有限,难以阻止后续水驱的前进方向,注入水流很快会继续沿着高渗透区域前进,并冲刷吸附滞留之上的聚合物,导致后续水驱的流度控制时间范围较短。

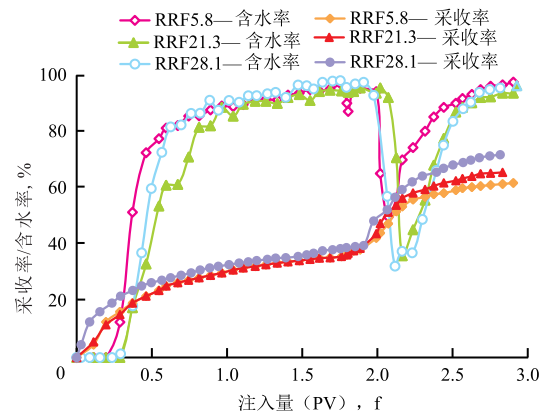
4.2 溶液残余阻力系数的影响

不同残余阻力系数体系驱油结果见图4a, f_w - R 特征曲线见图4b。通过图4b计算可得表4。从表4和图4可知,具有较强残余阻力系数的体系M₂和HM₃,其后续水驱的有效流度控制时间范围为0.122PV和0.184PV,远大于残余阻力系数5.8的驱油体系H₁的控制时间范围0.023PV。分析认为,一方面是残余阻力系数较高的体系中有更多的聚合物吸附滞留在多孔介质上,大幅度降低水相渗透率,增强了后续水驱冲刷掉的难度;另一方面注入水的流动状态受到多孔介质渗透性的影响而发生变化,波及区域更广泛,而恒定的水流量在更大的波及区域内,会降低对残余聚合物的冲刷作用,在一定程度上延长了后续水驱中聚合物的流度控制作用时间。

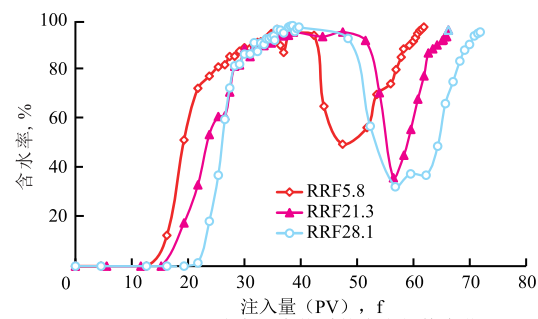
表4 不同残余阻力系数条件下的有效流度控制时间范围

Table 4 Effective mobility control time range of different RRF systems

体系	水驱特征曲线	后续水驱特征曲线	驱替范围值
H ₁	$y=206.84\ln(x)-562.93$ $R^2=0.9955$	$y=206.11\ln(x)-751.69$ $R^2=0.9717$	0~0.323 PV
M ₂	$y=130.78\ln(x)-362.76$ $R^2=0.9609$	$y=135.33\ln(x)-472.97$ $R^2=0.992$	0~0.422 PV
HM ₃	$y=320.34\ln(x)-991.15$ $R^2=0.9716$	$y=324.38\ln(x)-1288.5$ $R^2=0.9615$	0~0.484 PV



a.不同残余阻力体系的产出液特征



b.不同残余阻力体系的含水规律变化

图4 不同残余阻力系数体系的驱油特征曲线

Fig. 4 Displacement characteristic curves of different RRF systems

5 结论

1) 聚合物驱的流度控制作用可以改变原有的水驱特征曲线,通过对比分析聚合物驱前后的水驱曲线特征变化,来判断聚合物驱的有效流度控制时间范围是可行的。以某稠油油藏为例计算的聚合物驱有效流度控制时间范围是注入聚合物过程的0.3PV与后续水驱过程的0.27PV。

2) 影响聚合物驱有效流度控制的两种因素中,驱替剂的表现黏度影响较小,溶液的表现黏度提高3倍,延长控制时间仅0.006PV;而残余阻力系数对其影响较大,从5.8提高到21.3,有效流度控制时间范围要延长0.1PV。增强聚合物的残余阻力系数,能延长聚合物驱过程的有效流度控制时间。

参考文献

[1] 胡博仲.聚合物驱采油工程[M].北京:石油工业出版社,2004.
[2] 闻一平.不同代数树枝聚合物建立残余阻力系数的能力研究[D].成都:西南石油大学,2015.
[3] 张鹏.缔合型聚合物在孔隙介质中的流动性与驱油能力研究[D].东营:中国石油大学,2013.

(下转第46页)