

分质工具中注入聚合物表观黏度变化 数学模型的建立及应用

黄斌¹, 李晓慧¹, 傅程^{1,2}, 王鑫³

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油大庆油田博士后科研工作站, 黑龙江 大庆 163458;
3. 中国石油大庆油田采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163453)

摘要: 针对聚合物驱油过程中油层渗透率低、层间矛盾大而导致油层动用程度较低的问题, 油田现场一般采用分质工具。分质工具包括分质工具和分压工具。为系统地反映分质工具剪切作用对聚合物溶液黏度的影响, 建立了分质工具中注入聚合物表观黏度变化数学模型, 并分析了分质工具结构参数和聚合物溶液的注入量对表观黏度的影响。结果表明: 聚合物溶液的表观黏度随着分质工具收缩段长度、圆柱段半径、扩张段最大直径、扩张段长度的增大而增大; 随着收缩段半径的增大而减小; 分质工具圆管段长度对聚合物溶液的表观黏度大小无明显影响。聚合物溶液的表观黏度随着聚合物溶液注入量的增大而减小。计算结果可为工程实际需要进行优选分质工具结构参数提供理论参考依据。

关键词: 聚合物驱; 分质工具; 聚合物分子量; 表观黏度; 剪切作用

中国分类号: TE357.6

文献标识码: A

A mathematical model for the effect of shearing action on the apparent viscosity of polymer injected by a different medium injection tool

Huang Bin¹, Li Xiaohui¹, Fu Cheng^{1,2} and Wang Xin³

(1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Post-doctoral Research Station, Daqing Oilfield, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163458, China; 3. Research Institute of Oil Production Engineering, Daqing Oilfield, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China)

Abstract: Aiming at the low production level of the oil layer caused by the reservoirs with low permeability and the large contradiction between oil layers, we commonly use different medium injection tools in the oil fields to realize the match of polymer injection and polymer molecular weight to the oil layer. In order to reflect the effect of shearing on viscosity of polymer solution when it across the interstitial injection tools, a mathematical model about the impact on polymer apparent viscosity affected by shearing was established, and the influence of the structural parameters of interstitial injection tools and injection volume on the apparent viscosity of polymer was analyzed. The results showed that the apparent viscosity of the polymer solution went up when the length of contractile section, radius of cylindrical section, maximum diameter of dilated section and length of dilated section increased, while the apparent viscosity of polymer solution went down when the radius of the contractile section increased. And the length of cylindrical section had no effect on the apparent viscosity of polymer solution. The apparent viscosity of polymer solution decreased when the injection volume of the polymer solution increased. The calculation results can provide a theoretical reference for optimizing the structural parameters of the different medium injection tool.

Key words: polymer flooding, different medium injection tool, polymer molecular weight, apparent viscosity, shearing action

收稿日期: 2017-12-01。

第一作者简介: 黄斌(1982—), 男, 教授, 博士, 油气田开发方面的教学和科研。

基金项目: 国家自然科学基金“多元化学剂共存时分质剪切对聚合物分子的微观作用”(51804077); 中国博士后基金“三元分质过程碱和表面活性剂对聚合物分子的作用机理研究”(2017M611350)。

随着油田开发的不断深入,三次采油已成为提高采收率、保持油田可持续发展的重要手段,聚合物驱油技术已形成规模生产^[1-3]。目前,大庆油田主力油层聚驱驱替对象逐渐转向渗透率低、层间矛盾较大的油层。为了改善层间矛盾,提高低渗透油层的动用程度,大庆油田提出了对单管多层分质分压注入技术进行改善^[4-5]。分层注入技术一般包括分子量调节器喷嘴的分质注入和利用压力调节器为环形降压槽结构的分压注入^[6]。分质工具的功能是合理分配注入薄差油层中的聚合物分子量,而聚合物溶液的视黏度损失是判定分注工具性能的重要指标。

目前对于分质分压注入技术的研究主要利用数值分析和室内实验相结合的方式^[7-9]。刘兴君等利用室内实验证明了分层注入方式的可行性^[10]。李秋言等制作了平板径向物理模型,对笼统注采与分层注采进行了对比,提到波及程度对最终采收率有重要影响^[11]。李洁等发现低渗油层利用分质工具能达到提高聚合物驱的实际应用效果是由于聚合物分层注入技术能够防止在不同层段孔隙中堵塞^[12]。宋辉等从聚合物注入参数的角度对聚合物分质分压注入效果进行研究^[13]。李建云分析了聚合物驱分质分压注入技术的工艺原理、管柱结构、工艺参数对聚合物应用效果的影响^[14]。王晶利用数值分析方法优化了分注工具部分结构参数,证明由于溶液受到分压工具的剪切,驱替使用的聚合物溶液黏度也会相应下降^[15]。王立革结合室内实验对聚合物溶液的流变特性进行了研究^[16],其实验结果表明,聚合物溶液的黏弹性特征改变了溶液在多孔介质中的流变行为,能够有效地提高原油采收率,而且聚合物溶液黏弹性大小直接影响驱油效率。以上研究结果均证明分质分压注入技术可实现对分层配注量及分层分子量的双重控制,使聚合物分子量与油层渗透率的匹配关系趋于合理^[17]。但以上结果都不能系统地反映分质分压方式注入时分质工具剪切对聚合物溶液黏度的影响^[18-20]。

把聚合物溶液在分质工具喷嘴中的流动看作在一个变截面管道中先收缩再不变后扩张的流动过程,在此基础上,利用动量守恒原理推导了分质工具剪切对聚合物表观黏度的影响的数学模型,分析了收缩段半径、收缩段长度、圆柱段半径、圆柱段长度、扩张段长度、扩张段最大直径和聚合物注入量对分质工具中聚合物表观黏度的影响。此数学模型的建

立对科学选取分质工具,提高分层注采效率,具有重要意义。

1 模型建立

模型建立过程是把聚合物溶液在喷嘴中的流动看作在一个变截面管道中先收缩后不变再扩张的流动,在推导聚合物溶液经过等直径圆管的表观黏度模型基础上,得到聚合物溶液经过分质工具的表观黏度模型。

1.1 等径圆管时表观黏度分布模型

假设聚合物溶液不可压缩,在圆管中做一维稳态流动。由于幂律流体不具有结构性,其在圆管内的阻力分布与牛顿流体完全相同。对于水平圆管内的定常流动,其切应力在全管内满足:

$$\tau = \frac{\Delta p r}{2L} \quad (1)$$

式中: τ 为径向剪切应力,Pa; Δp 为进口端与出口端的压差,Pa; L 为圆管长度; r 为沿管径方向的长度,m。

因为聚合物溶液为假塑性流体,由幂律流体的本构方程可知:

$$\tau = K \left(-\frac{du}{dr} \right)^n \quad (2)$$

式中: K 为稠度系数,Pa·s; n 流性行为指数; u 为圆管内流体径向速度,m/s;

将式(1)代入将(2)则:

$$\frac{\Delta p r}{2L} = K \left(-\frac{du}{dr} \right)^n \quad (3)$$

或

$$du = -\left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{1}{n}} dr \quad (4)$$

对上式进行积分.从管壁到轴心处($R \rightarrow r$),流速从0变化到 u ,则:

$$u = \int_0^u du = -\left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \int_R^0 r^{\frac{1}{n}} dr \quad (5)$$

即

$$u = \left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{n+1}{n}} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (6)$$

式中: R 为圆管半径,m。

求得幂律流体圆管层流时的径向速度分布公式。

管路中的流量:

$$Q = \int_0^R u \cdot 2\pi r dr = 2\pi \left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{n+1}{n}} \int_0^R r \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] dr \quad (7)$$

$$Q = 2\pi \left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{n+1}{n}} \left[\frac{R^2}{2} - \left(\frac{1}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{n}{3n+1} R^{\frac{3n+1}{n}} \right] \quad (8)$$

式中: Q 为流量, m^3/s 。

化简得:

$$Q = \pi \left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{3n+1} R^{\frac{3n+1}{n}} \quad (9)$$

或

$$Q = \frac{\pi n R^3}{3n+1} \left(\frac{\Delta p R}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

上式表达了幂律流体在层流状态下的管路特性,即流量 Q 与压降 Δp 之间的函数关系。

由式(10)可求得幂律流体圆管层流断面平均流速:

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} = \left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{3n+1} R^{\frac{n+1}{n}} = \frac{nR}{3n+1} \left(\frac{\Delta p R}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

式中: V 为圆管层流断面平均流速, m/s 。

最大流速在管轴心处,将 $r=0$ 代入式(6),可得:

$$u_m = \left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{n+1}{n}} = \frac{nR}{n+1} \left(\frac{\Delta p R}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{3n+1}{n+1} V \quad (12)$$

或

$$V = \frac{n+1}{3n+1} u_m \quad (13)$$

式中: u_m 为管内最大径向速度, m/s 。

由幂律流体圆管层流断面平均流速的表达式可知,压降可用下式表示:

$$\Delta p = \frac{2LK V^n}{\left(\frac{n}{3n+1} \right)^n R^{1+n}} \quad (14)$$

根据流速,可以得出流体的径向剪切速率:

$$\dot{\gamma}_r = -\frac{du}{dr} = \left(\frac{\Delta p}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{1}{n}} = \frac{3n+1}{n} (2LK)^{\frac{1}{n}} \frac{Q}{\pi R^{\frac{3n+1}{n}}} r^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

式中: $\dot{\gamma}_r$ 为流体径向剪切速率, s^{-1} 。

由于 $\tau_r = \mu_r \dot{\gamma}_r$,

式中: τ_r 为径向剪切应力, Pa ; μ_r 为径向表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

代入动量方程 $\pi r^2(p_1 - p_2) - \tau_r 2\pi r L = 0$ 可得:

$$\Delta p \pi r^2 = 2\pi r L \mu_r \dot{\gamma}_r \quad (16)$$

则

$$\mu_r = (2L)^{\frac{1}{n}} K^{\frac{n-1}{n}} \pi^{1-n} R^{2-3n+\frac{1}{n}} \left(Q \times \frac{3n+1}{n} \right)^{n-1} r^{\frac{n-1}{n}} \quad (17)$$

根据牛顿—莱布尼茨公式,聚合物溶液在等径管任意界面上的平均剪切速率为:

$$\bar{\gamma} = \frac{\int_0^R \dot{\gamma}_r dr}{R} = \frac{3n+1}{n+1} (2LK)^{\frac{1}{n}} \frac{Q}{\pi R^3} \quad (18)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为流体任意界面的平均剪切速率, m/s 。

聚合物溶液在等径任意界面上的剪切应力为:

$$\tau_1 = K(\bar{\gamma})^n = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \times \frac{Q}{\pi r_1^3} \right)^n \quad (19)$$

式中: τ_1 为等径任意界面的剪切应力, Pa 。

聚合物溶液在等径圆管任意截面上的表观黏度为:

$$\mu_1 = \frac{\tau_1}{\bar{\gamma}} = K(\bar{\gamma})^{n-1} = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \times \frac{Q}{\pi r_1^3} \right)^{n-1} \quad (20)$$

式中: μ_1 为等径圆管任意截面上的表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

式(19)和式(20)表明聚合物溶液在等径圆管中沿流动方向表观黏度和剪切速率不变。

1.2 分质工具附近的表观黏度分布模型

聚合物溶液在喷嘴处的流动过程相当于收缩—圆管流动—扩张的过程,假定流体在喷嘴附近的流

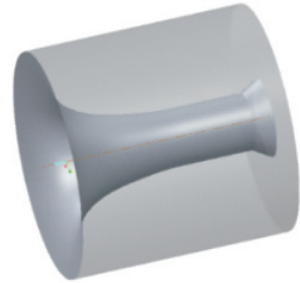


图1 分质工具结构示意图

Fig. 1 Structure of material divided tool

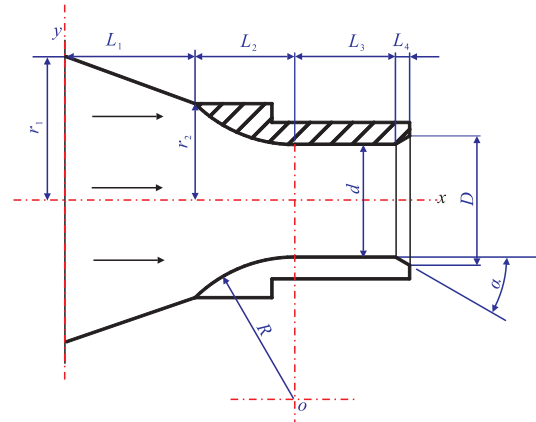


图2 分质工具结构剖面图

Fig. 2 Profile of material divided tool

动是一元、等温不可压缩的,忽略重力,不考虑流动过程中的过渡效应,分质工具结构如图1所示,工具剖面图如图2所示。

L_1 为注入井中心位置到喷嘴入口端的距离,m; L_2 为喷嘴收缩段长度,m; L_3 为喷嘴圆柱段长度,m; L_4 为喷嘴扩张段半径,m; r_0 为注入井井筒半径,m; r_1 为轴心处与喷嘴入口端面之间距离,m; r_2 为收缩段轴心处与喷嘴曲面之间的距离,m; r_3 为轴心处与喷嘴圆管段曲面之间距离,m; r_4 为轴心处与喷嘴扩张曲面之间距离,m; d 为圆管段直径,m; D 为扩张段最大直径,m。

在 x 轴方向上,当 $0 < x < L_1$ 时,轴心处与喷嘴入口端面之间距离可以用下式表示:

$$r_1 = \frac{R + \frac{d}{2} - r_0 - \sqrt{R^2 - L_2^2}}{L_1} x + r_0 \quad (21)$$

在 x 轴方向上,当 $L_1 < x < L_1 + L_2$ 时,轴心处与喷嘴收缩曲面之间距离可以用下式表示:

$$r_2 = \left(R + \frac{d}{2} \right) - \sqrt{R^2 - (x - L_1 - L_2)^2} \quad (22)$$

在 x 轴方向上,当 $L_1 + L_2 < x < L_1 + L_2 + L_3$ 时,轴心处与喷嘴圆管段曲面之间距离可以用下式表示:

$$r_3 = \frac{d}{2} \quad (23)$$

在 x 轴方向上,当 $L_1 + L_2 + L_3 < x < L_1 + L_2 + L_3 + L_4$ 时,轴心处与喷嘴扩张曲面之间距离可以用下式表示:

$$r_4 = \frac{d}{2} + \frac{D-d}{2L_4} x \quad (24)$$

聚合物溶液通过喷嘴的过程中,认为聚合物溶液为幂律流体,则喷嘴处流体单元的剪切速率和剪切应力可近似用圆管中的平均剪切速率、剪切应力表示。所以聚合物溶液在喷嘴中的表观黏度分布可表示为以下四段。

在 x 轴方向上,当 $0 < x < L_1$ 时,轴心处与喷嘴入口端面之间表观黏度分布:

$$\mu_1 = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi r_1^3} \right)^{n-1} = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi \left(\frac{R + \frac{d}{2} - r_0 - \sqrt{R^2 - L_2^2}}{L_1} x + r_0 \right)^3} \right)^{n-1} \quad (25)$$

在 x 轴方向上,当 $L_1 < x < L_1 + L_2$ 时,轴心处与喷嘴收

缩段表观黏度分布:

$$\mu_2 = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi r_2^3} \right)^{n-1} = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi \left(\left(R + \frac{d}{2} \right) - \sqrt{R^2 - (x - L_3)^2} \right)^3} \right)^{n-1} \quad (26)$$

在 x 轴方向上,当 $L_1 + L_2 < x < L_1 + L_2 + L_3$ 时,轴心处与喷嘴圆管流动段表观黏度分布:

$$\mu_3 = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi r_3^3} \right)^{n-1} = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi \left(\frac{d}{2} \right)^3} \right)^{n-1} \quad (27)$$

在 x 轴方向上, $L_1 + L_2 + L_3 < x < L_1 + L_2 + L_3 + L_4$,轴心处与喷嘴扩张段表观黏度分布:

$$\mu_4 = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi r_4^3} \right)^{n-1} = K \left(\frac{3n+1}{n+1} \frac{Q}{\pi \left(\frac{d}{2} + \frac{D-d}{2L_4} (x - L_1 - L_2) \right)^3} \right)^{n-1} \quad (28)$$

2 应用实例

计算中使用的聚合物溶液为20℃下质量浓度1600 mg/L的聚丙烯酰胺溶液。通过实验测量拟合应力和剪切率的关系,得到稠度系数 $K = 0.18367$,流性行为指数 $n = 0.774$ 。建立的数学模型中涉及的影响因素包括分质工具的结构参数和聚合物溶液的注入量,各影响因素的数值如表1所示。

2.1 分质工具结构参数的影响

分质工具的结构参数主要包括:收缩段长度、收缩段半径、圆柱段直径、圆柱段长度、扩张段最大直径、扩张段长度,下文对各因素对聚合物表观黏度的影响进行研究。

2.1.1 收缩段长度的影响

根据聚合物溶液在进入分质工具及在分质工具中的表观黏度分布数学模型计算聚丙烯酰胺溶液的表观黏度分布。计算结果绘制如图3所示。从图3

表1 计算参数
Table 1 Calculation parameters

序号	收缩段长度 L_c / mm	收缩段半径 R / mm	圆柱段半径 d / mm	圆柱段长度 L_c / mm	扩张段最大直径 D / mm	扩张段长度 L_d / mm	单井注入流量 Q / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
1	1	5	4	2	6	2	50
2	1	7.5	4	2	6	2	50
3	1	10	4	2	6	2	50
4	1	12.5	4	2	6	2	50
5	0.5	10	4	2	6	2	50
6	1	10	4	2	6	2	50
7	2	10	4	2	6	2	50
8	4	10	4	2	6	2	50
9	1	10	2	2	6	2	50
10	1	10	3	2	6	2	50
11	1	10	4	2	6	2	50
12	1	10	5	2	6	2	50
13	1	10	4	0.5	6	2	50
14	1	10	4	1	6	2	50
15	1	10	4	2	6	2	50
16	1	10	4	4	6	2	50
17	1	10	4	2	6	0.5	50
18	1	10	4	2	6	1	50
19	1	10	4	2	6	2	50
20	1	10	4	2	6	4	50
21	1	10	4	2	4.5	2	50
22	1	10	4	2	5	2	50
23	1	10	4	2	5.5	2	50
24	1	10	4	2	6	2	50
25	1	10	4	2	6	2	30
26	1	10	4	2	6	2	40
27	1	10	4	2	6	2	50
28	1	10	4	2	6	2	60

可以看出,在聚合物溶液流动进入分质工具过程中,溶液的表观黏度急剧降低,聚合物溶液进入分质工具的瞬间表观黏度下降幅度最大。在分质工具中聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分

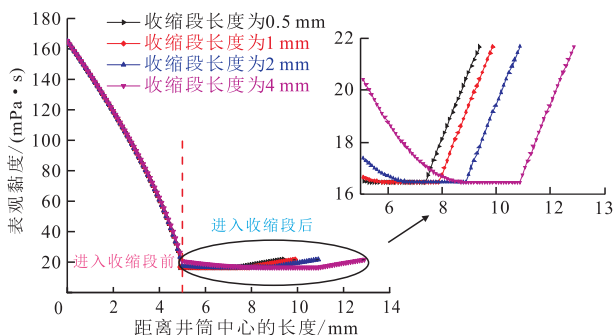


图3 不同收缩段长度的聚合物表观黏度

Fig. 3 Polymer apparent viscosity with different lengths of contraction section

布规律。当收缩段长度分别为0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm时,在喷嘴的收缩段,聚合物表观黏度随着距离注入端面的距离的增加而减小,这是由于收缩段边界形状呈圆弧形,聚合物受到的剪切应力逐渐减小,表观黏度变化减缓;圆柱段由于直径不变,聚合物受到的剪切应力不变,聚合物表观黏度未发生变化;在扩张段聚合物表观黏度有所恢复,呈直线上升趋势。同一收缩段长度下收缩段与扩张段的聚合物溶液表观黏度相比较,收缩段变化幅度小于扩张段变化幅度。收缩段长度分别为0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm时,聚合物表观黏度下降幅度分别为0.42%, 1.7%, 6.3%, 21.1%。对比不同收缩段长度分质工具发现,收缩段长度越长,聚合物表观黏度损失越大。随着收缩段长度增加,聚合物溶液受到剪切应力作用的时间增长,聚合物表观黏度损失增大,且收缩段长度增加越多,

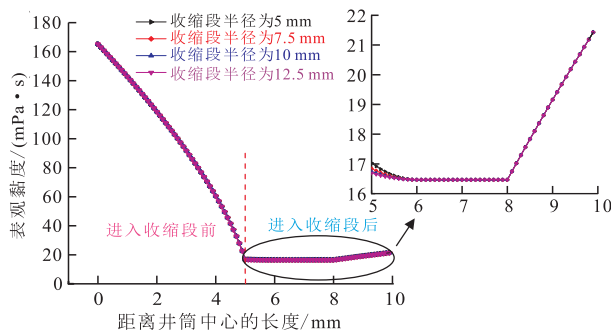


图4 不同收缩段半径的聚合物表观黏度

Fig. 4 Polymer apparent viscosity with different radiuses of contraction section

聚合物表观黏度下降幅度越大。

2.1.2 收缩段半径的影响

由图4可知,在聚合物溶液流动进入分质工具过程中,溶液的表观黏度急剧降低,聚合物溶液进入分质工具的瞬间表观黏度下降幅度最大。在分质工具中聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分布规律。在分质工具收缩阶段,收缩段半径对聚合物溶液表观黏度的影响与收缩段长度对其影响相反,聚合物溶液经过收缩段半径为5 mm,7.5 mm,10 mm,12.5 mm的分质工具,其表观黏度下降幅度分别为3.3%,2.1%,1.6%,1.3%。可知,随着分质工具收缩段半径的增大,聚合物表观黏度损失降低,边界形状越平缓,聚合物溶液受到工具的剪切作用越小,对聚合物表观黏度影响越小。

2.1.3 圆柱段直径的影响

由图5可知,在聚合物溶液流动进入分质工具过程中,溶液的表观黏度急剧降低,聚合物溶液进入分

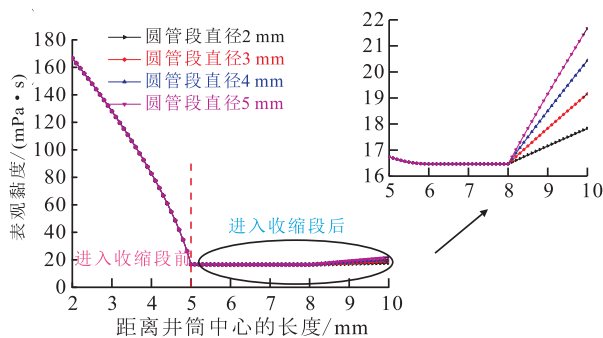


图5 不同圆柱段直径的聚合物表观黏度

Fig. 5 Polymer apparent viscosity with different diameters of cylindrical section

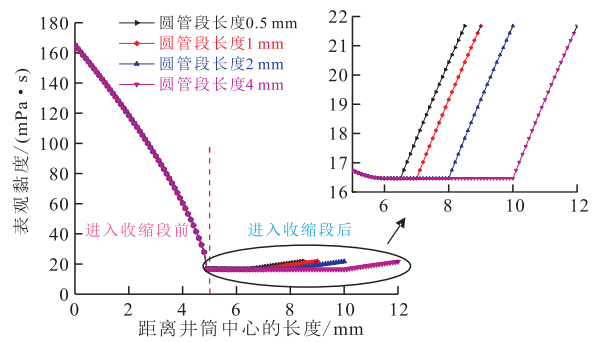


图6 不同圆柱段长度对聚合物表观黏度影响

Fig. 6 Polymer apparent viscosity with different lengths of cylindrical section

质工具的瞬间表观黏度下降幅度最大。在分质工具中聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分布规律。

2.1.4 圆柱段长度的影响

由图6可知,在聚合物溶液流动进入分质工具过程中,溶液的表观黏度急剧降低,聚合物溶液进入分质工具的瞬间表观黏度下降幅度最大。在分质工具中聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分布规律。聚合物溶液经过圆管段长度分别为0.5 mm,1 mm,2 mm,4 mm的分质工具,其表观黏度在工具各段保持不变。

2.1.5 扩张段最大直径的影响

由7可知,在聚合物溶液流动进入分质工具过程中,溶液的表观黏度急剧降低,聚合物溶液进入分质工具的瞬间表观黏度下降幅度最大。在分质工具中聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分布规律。聚合物溶液经过扩张段最大直径分别为

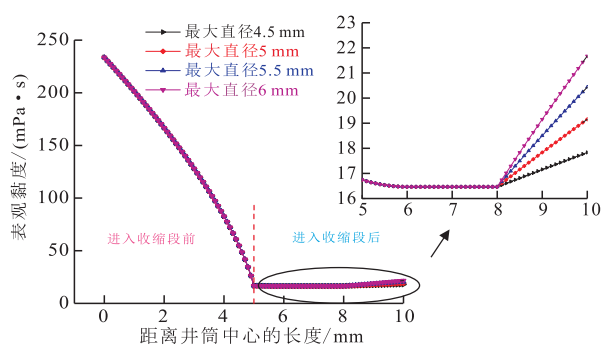


图7 不同扩张段最大直径对聚合物表观黏度影响

Fig. 7 Polymer apparent viscosity with different maximum diameters of expansion section

4.5 mm, 5 mm, 5.5 mm, 6 mm 的分质工具, 与初始聚合物表观黏度相比, 扩张段表观黏度恢复的比例分别为 7.6 %, 8.2 %, 8.7 %, 9.3 %, 可见其表观黏度恢复程度随扩张段最大直径的增大而增大。

2.1.6 扩张段长度的影响

由图 8 可知, 在聚合物溶液流动进入分质工具过程中, 溶液的表观黏度急剧降低, 聚合物溶液进入分质工具的瞬间表观黏度下降幅度最大。在分质工具中聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分布规律。聚合物溶液经过扩张段长度分别为 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm 的分质工具, 与初始聚合物表观黏度相比, 扩张段表观黏度恢复的比例分别为 10.8 %, 11.6 %, 13.1 %, 15.9 %。在分质工具扩张阶段, 扩张段长度对聚合物溶液表观黏度的影响与扩张段最大直径对其影响相同, 随着扩张段长度的增加表观黏度增加。以上计算结果均证明分质工具边界形状改变聚合物溶液受到的剪切应力同时影响聚合物表观黏度。

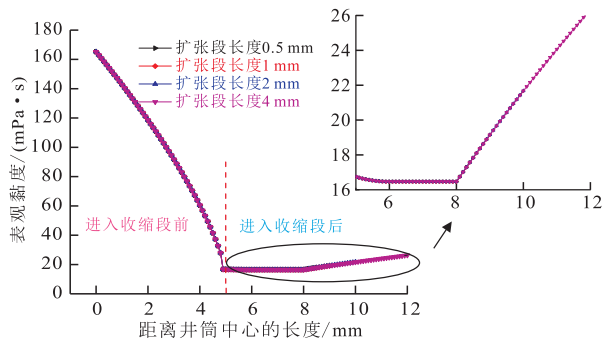


图 8 不同扩张段长度对聚合物表观黏度影响

Fig. 8 Polymer apparent viscosity with different maximum lengths of expansion section

2.2 聚合物注入量的影响

利用聚合物溶液在分质工具附近的表观黏度模型计算得到不同注入量下聚合物溶液在分质工具附近表观黏度的分布如图 9 所示。由图 9 可知, 聚合物溶液流动进入分质工具过程中, 溶液的表观黏度急剧降低, 聚合物溶液进入分质工具的瞬间表观黏度下降幅度最大。在分质工具中聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分布规律。由以上结果可知不同的注入量对分质工具的表观黏度大小的影响体现在整个聚合物溶液流经分质工具的过程中。随着注入量的增大, 聚合物表观黏度减小。当

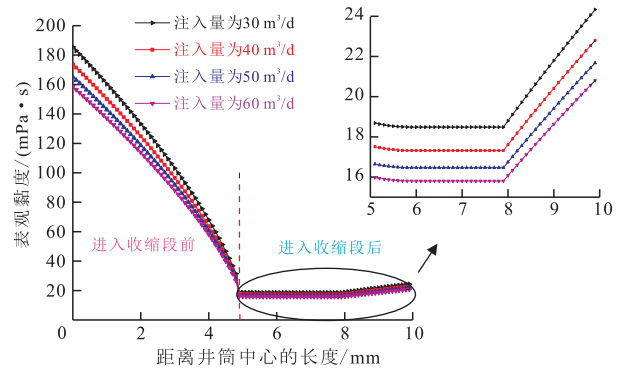


图 9 不同注入量对聚合物表观黏度分布影响

Fig. 9 Polymer apparent viscosity with different injection rate

聚丙烯酰胺溶液注入量分别为 30 m³/d, 40 m³/d, 50 m³/d 和 60 m³/d 时。聚合物表观黏度下降幅度均约 1.7 %, 即注入量的变化对于聚丙烯酰胺溶液经过分质工具过程的表面黏度影响很小, 几乎保持不变。说明注入量的变化基本不影响聚合物溶液在分质工具附近表观黏度的变化幅度, 只影响表观黏度大小的分布。

3 结论

1) 聚合物溶液流动进入分质工具的瞬间, 表观黏度急剧降低, 下降幅度最大。在分质工具中, 聚合物溶液表观黏度表现为先下降再不变后上升的分布规律。

2) 分质工具收缩段长度增加, 聚合物表观黏度损失增大; 分质工具收缩段半径的增加, 聚合物表观黏度损失降低; 分质工具的圆柱段半径增加, 聚合物表观黏度增大, 分质工具扩张段最大直径增加, 聚合物表观黏度增大; 分质工具圆管段长度增加, 对聚合物表观黏度没有影响; 分质工具扩张段长度的增加, 表观黏度增大。

3) 聚合物溶液的表观黏度随着聚合物溶液注入量的增大而减小, 但注入量的变化基本不影响聚合物溶液在分质工具附近表观黏度的变化幅度, 只影响表观黏度大小的分布。

参考文献

- [1] 班久庆. 化学驱分质工具对溶液流动影响及工具优选研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [2] 陈明强, 孙志强, 王江顺, 等. 配注过程中聚合物溶液的黏度损失分析 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2007, 22(3): 60-63.

- [3] 施雷庭,徐豪飞,叶仲斌,等.剪切作用对不同聚合物溶液流度控制能力影响研究[J].油田化学,2010,27(2):174-178.
- [4] 程杰成,廖广志,杨振宇,等.大庆油田三元复合驱矿场试验综述[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2):46-49.
- [5] 裴晓含,段宏,崔海清,等.聚合物驱偏心分质注入技术[J].大庆石油地质与开发,2006,25(5):65-66.
- [6] 杨兴宙.三元体系在喷嘴中流动的数值模拟及实验研究[D].大庆:东北石油大学,2016.
- [7] 高德洁.强碱三元复合驱小尺寸压力调节器的结构优化研究[D].大庆:东北石油大学,2013.
- [8] 孙玉豹.带有淹没射流的圆柱腔室分层配注器中流场的数值模拟[D].大庆:大庆石油学院,2009.
- [9] 韩宇,吕玲玲,蔡萌,等.三元复合溶液在偏心配注器喷嘴中流动流场的数值分析[A]//采油工程文集.北京:石油工业出版社,2014.
- [10] 刘兴君,赵政玮,韩宇.聚合物驱分层注入技术的开发与应用[J].中国石油和化工,2009,16(9):44-46.
- [11] 李秋言,侯吉瑞,谢东海,等.分层注采三元复合驱对大庆二类油层适应性评价[J].科学技术与工程,2016,16(28):63-69.
- [12] 李洁,隋新光,邵振波.大庆油田葡一组油层聚驱后剩余油微观分布规律研究[J].大庆石油地质与开发,2005,24(2):26-28.
- [13] 宋辉.喇嘛甸油田二类油层聚驱分质分层注入研究[D].大庆:大庆石油学院,2009.
- [14] 李建云.聚合物驱多层分质分压注入技术研究与应[J].内蒙古石油化工,2010,36(1):124-126.
- [15] 王晶.聚合物驱分层注入工具性能提升技术研究[A]//采油工程文集.北京:石油工业出版社,2015.
- [16] 王立苹.聚合物黏弹性的影响因素[J].中外能源,2010,15(3):57-61.
- [17] 戴涛.炮眼剪切对注入聚合物溶液黏度影响的数学模型[J].油气地质与采收率,2012,19(2):29-36.
- [18] 张金国.聚合物溶液粘度的主要影响因素分析[J].断块油气田,2005,12(1):57-59.
- [19] 吴淑云,黄丽,孙刚,等.驱油用聚合物溶液黏度测试方法研究[J].大庆石油地质与开发,2006,25(2):84-86.
- [20] 汪庐山,张月.交联聚合物调驱液中聚合物最低浓度的确定方法[J].油田化学,2000,17(4):340-342.

(编辑 常燕)

(上接第47页)

- [12] Gillard M R, Medvedev O O, Hosein P R, et al. A new approach to generating fracture conductivity[C]// paper SPE-135034-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 19-22 September 2010, Florence, Italy.
- [13] Viswanathan A, Altman R M, Oussoltsev D, et al. Completion evaluation of the eagle ford formation with heterogeneous proppant placement[C]// paper SPE-149390-MS presented at the Canadian Unconventional Resources Conference, 15-17 November 2011, Calgary, Alberta, Canada.
- [14] Altman R M, Viswanathan A, Xu J, et al. Understanding the impact of channel fracturing in the eagle ford shale through reservoir simulation[C]// paper SPE-153728-MS presented at the SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 16-18 April 2012, Mexico City, Mexico.
- [15] Medvedev A V, Kraemer C C, Pena A A, et al. On the mechanisms of channel fracturing[C]// paper SPE-163836-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6 February 2013, The Woodlands, Texas, USA.
- [16] 温庆志,高金剑,黄波,等.通道压裂砂堤分布规律研究[J].特种油气藏,2014,21(4):89-92.
- [17] 朱洵,荣起国.基于偏最小二乘回归的基因网络数学建模[J].系统仿真学报,2009,21(4):1148-1154.
- [18] 王佩珊,赵立强,罗志锋,等.基于偏最小二乘回归的快速产能评估方法[J].石油天然气学报,2014,36(7):126-129.

(编辑 尹淑容)