

# 油藏流动条件下聚合物溶液老化规律及应用

林春阳<sup>1,2</sup>, 薛新生<sup>1,2</sup>, 朱玥珺<sup>1,2</sup>, 张贤松<sup>1,2</sup>, 孙福街<sup>1,2</sup>, 刘慧卿<sup>3</sup>

(1.海洋石油高效开发国家重点实验室,北京 100027; 2.中海油研究总院,北京 100027;

3.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249)

**摘要:**为研究聚合物溶液运移过程中老化作用对油田采收率的影响,设计了聚合物溶液的动态老化实验,通过不同体积比的聚合物溶液混合过程模拟新老聚合物溶液混合下的动态老化过程。实验结果表明,混合后聚合物溶液的粘度约等于混合前各自溶液粘度以质量为权值的加权和,与实测粘度的最大差值不超过1.0 mPa·s;聚合物溶液的混合老化过程与以往的静态老化过程类似,因此传统的静态老化过程可以用于近似聚合物溶液运移过程中的动态老化过程。通过数据分析,提出了混合后聚合物溶液粘度的估算方法。在此基础上,提出了相应的数值模拟思路。计算结果表明,聚合物溶液的老化作用对油田采收率影响较大,在数值模拟中需要考虑老化作用对油田采收率的影响。在油田的实际开发过程中,需要对聚合物溶液的热稳定性进行定量评估。

**关键词:**聚合物驱 采收率 新老混合 老化作用 粘度估算 油藏数值模拟

**中图分类号:** TE357.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)01-0077-04

目前,聚合物驱油技术已经在油田得到广泛应用<sup>[1-6]</sup>,且效果良好。对聚合物在多孔介质中渗流规律的研究是现场应用取得成功的主要原因之一。研究表明<sup>[7-11]</sup>,在聚合物驱过程中,需要考虑聚合物溶液的粘弹性、剪切稳定性、耐盐性和热稳定性(老化过程)等因素对其驱替效果的影响。除聚合物的热稳定性外,针对其他聚合物溶液的性质提出了相应的数学、数值模型<sup>[12-13]</sup>,并在数值模拟技术中实现,为在矿场范围评估聚合物的驱油效果提供了强有力的技术保证。然而,对于聚合物溶液的老化过程研究还仅限于聚合物的性能评价范畴,无法与油藏数值模拟技术结合,也就无法定量评估聚合物溶液的老化作用对油田最终采收率的影响。其原因是:聚合物溶液在地层中是流动的,对于某一特定网格,驱替过程是聚合物溶液不断进行新老交替且相互混合的过程。因此,常规聚合物溶液老化作用测试结果无法应用于油藏数值模拟,主要困难在于无法确定新老聚合物混合后溶液的有效粘度。

为此,笔者以某油田注入聚合物 HPAM 为研究对象,针对聚合物溶液在地层中的流动过程,设计了聚合物溶液的动态老化实验。通过实验数据分析,掌握了该类聚合物的动态老化规律。在此基础

上,通过数值模拟技术,在典型模型条件下评估了聚合物的老化作用对油田采收率的影响。

## 1 实验方法

实验采用某油田注入聚合物 HPAM,其相对分子质量为 $2.8 \times 10^7$ ,水解度为28%。生产污水中钠钾离子、镁离子、钙离子、氯离子、碳酸根和碳酸氢根的质量浓度分别为819, 9, 35, 727, 50和974 mg/L,总矿化度为2 614 mg/L。在57 °C下对聚合物溶液进行配制,过程如下:①采用清水配制质量浓度为5 000 mg/L的聚合物母液;②用生产污水稀释母液至质量浓度为1 500 mg/L;③通过近井地带模拟剪切装置<sup>[14]</sup>模拟聚合物注入过程中的炮眼剪切过程,得到目标液,并置于恒温箱中。

混合步骤如下:①在57 °C下测量目标液(原液1)老化0, 5, 15, 30, 60, 90 d后的粘度;②原液1老化30 d后,再次配制聚合物溶液(原液2),并测量原液2老化0, 5, 15, 30, 60 d后的粘度;③将老化30, 60和90 d后的原液1分别与原液2按照体积比为1:1的比例进行混合,得到混合液1, 2和3,以模拟聚合物溶液在地层中的混合过程,并对混合液的粘度进行

收稿日期:2012-11-28。

作者简介:林春阳,男,博士,从事油气藏开发方面的工作。联系电话:13716309596, E-mail:linchy@cnooc.com.cn。

基金项目:国家“973”课题“海洋硫化物采掘机理与稠油聚合物驱问题研究”(2010CB735505),国家“973”课题“海底资源开采的关键力学问题研究”(2012CB724205),国家科技重大专项“海上稠油化学驱油技术”(2011ZX05024-004)。

测量;④为进一步明晰聚合物溶液混合后的粘度变化规律,将老化30,60和90 d后的原液1分别与原液2按照体积比为2:1的比例进行混合,得到混合液4,5和6,测量这3个混合液的粘度。

## 2 实验结果与分析

由原液1和2、混合液1—3的粘度随时间的变化过程(图1)可以看出,原液1与原液2的老化曲线趋势类似,测量得到的粘度略有差别,应是实验误差导致。对比混合液1的老化曲线与原液1和原液2的老化曲线发现,混合液1的老化趋势与原液2的老化趋势相似,数值相近。同时混合液2和3的粘度随时间的变化而呈逐渐下降的趋势。两者下降的幅度相对于混合液1要小,主要原因应是混合液2和3的混合时间处于原液1和2老化过程中的中后期,聚合物的性质逐渐趋于稳定,因此导致了混合液2和3的粘度下降速度小于混合液1。总体上混合液与原液的老化过程相似,测量得到的粘度值相近,说明静态老化过程可以用来近似描述聚合物溶液在地层中流动的动态老化过程。

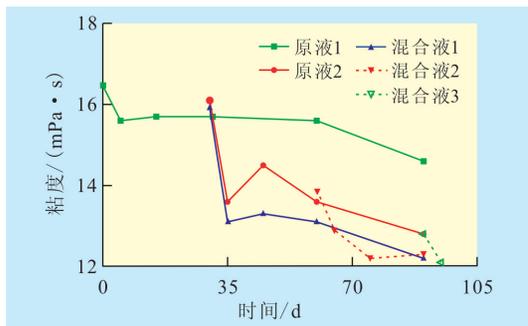


图1 57 °C下聚合物溶液的老化曲线

通过数据分析发现,混合后聚合物溶液的初始粘度近似等于混合前各自溶液粘度以质量为权值的加权和,即

$$\mu = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_i \quad (1)$$

其中

$$\alpha_i = \frac{C_{pi} V_i}{\sum_{i=1}^n C_{pi} V_i} \quad (2)$$

式中: $\mu$ 为不同老化时间聚合物溶液混合后的初始粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $i$ 为不同老化时间的聚合物溶液编号,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $\alpha_i$ 为某一老化时间的权值;  $\mu_i$ 为不同老化时间聚合物溶液的粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $C_{pi}$ 为某一老化时间聚合物溶液的质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V_i$ 为

某一老化时间聚合物溶液的体积,  $\text{m}^3$ 。

以混合液1, 2和3为例,其初始粘度分别为15.9, 13.9和12.8  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;计算得到加权和分别为15.9, 14.6和13.7  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。两者最大差值不超过1.0  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

采用相同方法,对混合液4, 5和6的粘度进行了测量和估算,测量值分别为15.9, 14.6, 13.4  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;估算值为15.8, 14.9, 14.0  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。混合液4, 5和6的粘度估算值比测量值略高,最大差值为0.6  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,证明了采用以质量为权值的加权和的方式可以较为准确地估算新老聚合物混合后的溶液粘度。

HPAM为线型柔性链聚合物,老化的主要原因是溶液中的聚合物大分子降解<sup>[15]</sup>,即聚合物溶液的平均相对分子质量下降。韩杰等<sup>[10]</sup>通过实验发现,不同相对分子质量的聚合物溶液混合后的粘度同样近似等于混合前各自溶液粘度以质量为权值的加权和,亦从侧面证实了所发现规律的正确性<sup>[12]</sup>。

该规律较为简单,解决了以往数值模拟中无法确定新老聚合物混合后的有效粘度的难题,从而为矿场范围内评价聚合物溶液的老化作用对油田开发的影响提供了可能。其具体步骤如下:①获得聚合物溶液在地层中运移时间内的老化过程。②通过笔者发现的规律计算网格内聚合物溶液的粘度。③利用计算出来的粘度,以实验得到的老化过程为参照反推出混合后聚合物溶液的老化时间 $t_{\text{aging}}$ 。④下一个时间步长为 $\Delta t$ ,将老化时间加上 $\Delta t$ ,即 $t_{\text{aging}}^{n+1} = t_{\text{aging}}^n + \Delta t$ ,其中, $t_{\text{aging}}^{n+1}$ 和 $t_{\text{aging}}^n$ 分别为在第 $n+1$ 和 $n$ 个时间步下聚合物溶液的等效老化时间;同样以实验得到的老化过程为参照,得到 $t_{\text{aging}}^{n+1}$ 下的网格内聚合物溶液的粘度。⑤重复步骤②。

## 3 模拟算例

以黑油模型为基础,聚合物溶液的老化过程可用自然对数的指数形式表示为

$$\mu_p^0 = \mu_w \left[ 1 + (A_1 C_p + A_2 C_p^2 + A_3 C_p^3) \beta (C_{\text{sep}}) e^{-\gamma t} \right] \quad (3)$$

式中: $\mu_p^0$ 为未经剪切情况下聚合物溶液的粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_w$ 为水相粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $A_1, A_2, A_3$ 为与聚合物溶液质量浓度相关的粘度系数;  $C_p$ 为聚合物溶液的质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\beta$ 为离子质量浓度造成聚合物溶液粘度变化的函数,以表的形式输入;  $C_{\text{sep}}$ 为离子质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\gamma$ 为聚合物溶液老化系数;  $t$ 为聚合物溶液的老化时间,  $\text{d}$ 。

在聚合物溶液的流动过程中同时考虑剪切降粘和吸附滞留的影响。其中,聚合物溶液的剪切降粘过程符合 Meter 和 Bird 方程<sup>[16]</sup>;吸附过程采用 Langmuir 方程;渗透率下降系数与吸附量成线性关系。

以海上某油田为例,建立了3层油藏反九点井网典型模型。油藏基本参数包括:油藏为390 m×390 m的正方形区域;3层油藏垂向网格厚度分别为20, 16和12 m,孔隙度分别为0.263, 0.256和0.249,横向渗透率分别为 $1\ 900\times 10^{-3}$ ,  $1\ 400\times 10^{-3}$ 和 $800\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ;垂向渗透率为横向渗透率的1/100;油水两相密度分别为680和1 000 kg/m<sup>3</sup>;岩石密度为2 700 kg/m<sup>3</sup>;油藏顶深为1 500 m;参考深度为1 500 m;参考深度处的初始压力为15 MPa;初始含油饱和度为0.6。

聚合物溶液的物性参数包括: $A_1=4.889\ 9$ ;  $A_2=3.770\ 5$ ;  $A_3=0.942\ 3$ ;最大残余阻力系数为1.8;最大吸附量为 $5.5\times 10^{-4}\ \text{kg/kg}$ ;吸附系数为 $1.16\ \text{m}^3/\text{kg}$ ;聚合物溶液的老化系数为0。

注入井的注入速度为500 m<sup>3</sup>/d;注水1 000 d后,开始聚合物驱,聚合物质量浓度为1.25 kg/m<sup>3</sup>,注入时间为4 a。此后,继续注水,直到油田综合含水率达到98%。生产井中边井和角井的采液量分别为83和42 m<sup>3</sup>/d。

### 3.1 正确性检验

通过商业软件 Eclipse 验证了计算结果的正确性。从图2可见,在不考虑聚合物溶液老化作用影

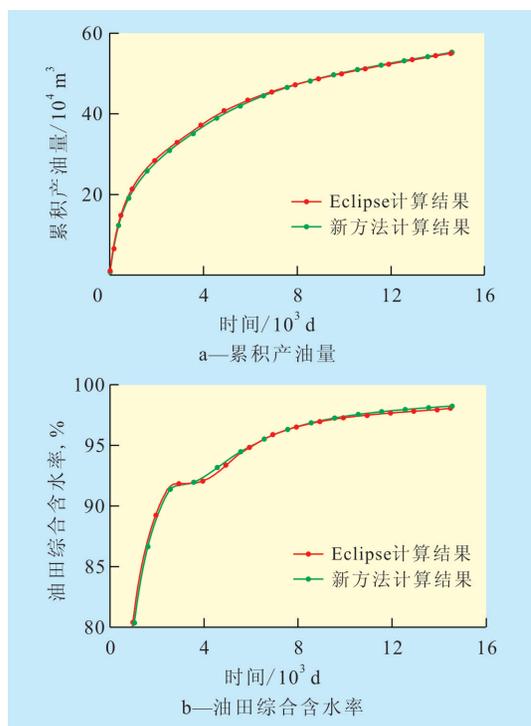


图2 新方法与Eclipse软件的计算结果对比

响的情况下,新方法与Eclipse的计算结果相近,油田累积产油量最大相对误差为1.5%,综合含水率最大相对误差为0.5%,验证了计算结果的正确性。

### 3.2 聚合物溶液老化作用敏感性分析

通过修改聚合物溶液的老化系数来分析其老化作用对聚合物驱效果的影响。对聚合物溶液老化系数取3个水平,分别为0, -0.001, -0.01。其物理意义分别为:聚合物驱过程不考虑老化作用;聚合物在地层中运移1 000 d后,粘度变为原来的1/e(与实验中的老化速度相当);聚合物在地层中运移100 d后,粘度变为原来的1/e。当油田综合含水率达到98%,聚合物老化系数分别为0, -0.001和-0.01时,采收率分别为52.7%, 48.1%和46.9%。可以看出,不考虑聚合物溶液老化作用和考虑老化作用的采收率差别较大,其主要原因是聚合物溶液的老化作用降低了聚合物的粘度,使得油田综合含水率达到98%的时间大大提前,导致考虑老化作用时的采收率偏低。通过以上3种情况的油田综合含水率(图3)的对比,可以更好地说明聚合物溶液的老化作用对聚合物驱效果的影响。当不考虑聚合物溶液老化作用时,油田综合含水率在聚合物注入后有较为明显的改变;考虑老化作用时,聚合物溶液的老化速度越快,对降低油田综合含水率的作用就越不明显。两者相差最大值约为1.5%。从而导致当油田综合含水率达到98%时,油田采收率随着老化作用的增强而逐渐降低,符合油田现场聚合物驱的客观规律。因此,在采用数值模拟技术评价聚合物驱效果时,需要考虑聚合物的老化作用影响。这也定性说明了笔者提出的数值处理方法的正确性。

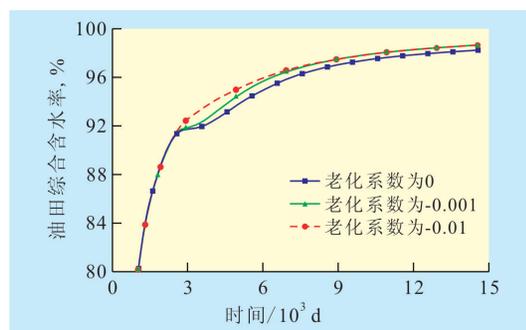


图3 不同聚合物溶液老化系数下油田综合含水率

## 4 结论

设计了新老聚合物动态混合老化实验,实验结果表明:混合后聚合物溶液的动态老化过程与静态老化过程相似,可采用静态老化过程近似描述聚合

物的动态老化过程;通过对实验数据的分析发现,混合后聚合物溶液的粘度近似等于混合前各自溶液粘度以质量为权值的加权和;该规律可以很好地用来解决数值模拟中新老聚合物混合后的粘度估算问题,为在矿场范围定量评价老化作用对油田开发的影响提供了可能。数值模拟结果表明,聚合物的老化作用对油田采收率有较大影响,需要在数值模拟中考虑聚合物老化作用的影响。

#### 参考文献:

- [1] 刘睿,姜汉桥,张贤松,等.海上中低黏度油藏早期注聚合物见效特征研究[J].石油学报,2010,31(2):280-283.
- [2] Liu He, Wang Xin, Li Guo, et al. An enhanced oil recovery technology continually after polymer-flooding [R]. SPE 144250-MS, 2011.
- [3] 宋新旺,李哲.缔合聚合物在多孔介质中的渗流运移特征[J].油气地质与采收率,2012,19(4):50-52.
- [4] 王启民,冀宝发,隋军,等.大庆油田三次采油技术的实践与认识[J].大庆石油地质与开发,2001,20(2):1-8.
- [5] 曹瑞波,王晓玲,韩培慧,等.聚合物驱多段塞交替注入方式及现场应用[J].油气地质与采收率,2012,19(3):71-73.
- [6] 刘杰,王学惠,刘影,等.丙烯酰胺类聚合物在油田中的应用[J].化学工程师,2006,131(8):21-23.
- [7] 张冲,李季,黄芬,等.耐温抗盐新型聚合物驱油剂性能评价[J].油田化学,2007,24(3):228-231.
- [8] 张玉丰,吴晓东,郭树强,等.高浓度、超高相对分子量聚合物体系性能与驱油效果评价[J].油田化学,2006,23(4):345-348.
- [9] Jiang Haifeng, Wu Wenxiang, Wang Demin, et al. The effect of elasticity on displacement efficiency in the lab and results of high-concentration polymer flooding in the field [R]. SPE 115315-MS, 2008.
- [10] 韩杰,孔柏岭,吕小华.不同油藏温度条件下HPAM水解度与黏度变化规律[J].油田化学,2006,23(3):235-238.
- [11] 董朝霞,宋锦宏,林梅钦,等.盐浓度对交联聚合物溶液剪切增稠现象的影响[J].石油钻采工艺,2009,31(5):81-84.
- [12] 绍振波,陈国,孙刚.新型聚合物驱油数学模型[J].石油学报,2008,29(3):409-413.
- [13] 陈国,赵刚,马远乐.粘弹性聚合物驱油的数学模型[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(6):882-885.
- [14] 姜伟,叶仲斌,薛新生,等.一种带有三层压实砂体的圆台桶体状近井地带模拟装置:中国,201020678794.4[P].2011-12-07.
- [15] 刘玉章,等.聚合物驱提高采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [16] 姚军,吴明录,胡航.碱-聚合物复合驱油藏流线数值试井解释模型及其应用[J].石油学报,2008,29(6):892-898.
- [14] 李爱芬,刘艳霞,张化强,等.用逐步稳态替换法确定低渗油藏合理井距[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(1):89-92.
- [15] 刘启国,王瑞,李邗,等.考虑启动压力梯度和高速非达西效应的低渗透气藏水平井产能[J].油气地质与采收率,2010,17(5):53-56.
- [16] 张建国,雷光伦,张艳玉.油气层渗流力学[M].东营:石油大学出版社,2004:12-15.
- [17] Burden R L, Faires J D. Numerical analysis [M]. 9th ed. Canada: Cengage Learning, 2010:56-66.

编辑 刘北羿

#### (上接第76页)

- elling and Software, 2002, 15(3):303-312.
- [9] 马晓丹,同登科,马华伟.变形双重介质分形油藏非达西流动分析[J].计算物理,2007,24(2):198-202.
- [10] 孙致学,姚军,唐永亮,等.低渗透油藏水平井联合井网型式研究[J].油气地质与采收率,2011,18(5):74-77.
- [11] 计秉玉,何应付.基于低速非达西渗流的单井压力分布特征[J].石油学报,2011,32(3):466-469.
- [12] 张贤松,谢晓庆,陈民锋.低渗透断块油藏合理注采井距研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):94-96.
- [13] 朱维耀,刘今子,宋洪庆,等.低/特低渗透油藏非达西渗流有效动用计算方法[J].石油学报,2010,31(3):452-457.

编辑 常迎梅