

◀“863”计划专栏▶

# 聚合物在多孔介质中的流变性研究

张 星<sup>1</sup> 李兆敏<sup>2</sup> 徐林静<sup>3</sup>

(1. 中国石化胜利油田分公司 采油工艺研究院, 山东 东营 257000; 中国石油大学(华东), 山东 东营 257061; 3. 中国石油大学(北京) 石油天然气工程学院, 北京 昌平 102249)

**摘要:** 聚合物溶液的黏度是油藏方案设计、动态预测和数值模拟中最为重要的输入参数。其中, 聚合物的宏观黏度与聚合物经过多孔介质后的剪切黏度具有很大差异。为了进一步完善聚合物驱设计过程中的黏度, 采用室内物理模拟方法, 利用岩心驱替装置系统分析了不同渗透率、不同质量浓度聚合物的剪切流变性。结果表明, 聚合物经过多孔介质剪切后表观黏度均下降, 随着岩心渗透率降低, 黏度降解的程度增加, 黏度损失率均随岩心渗透率的增大而减小。相同渗透率条件下, 随着质量浓度的增加, 聚合物溶液剪切后表观黏度升高。当聚合物质量浓度低时, 黏度剪切降解对渗透率不敏感, 随着质量浓度的增加, 黏度损失率增加, 黏度与剪切次数呈衰减趋势。

**关键词:** 聚合物; 多孔介质; 流变性; 非均质; 剪切降黏

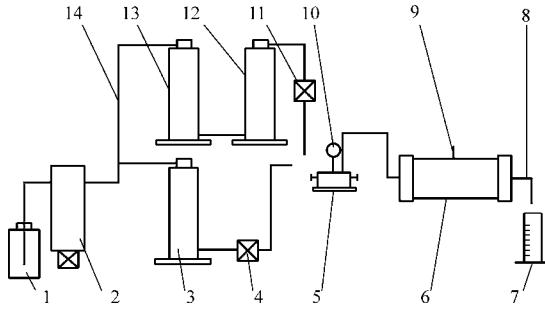
**中图分类号:** TE357.46   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-0890(2010)01-0008-03

聚合物溶液在多孔介质中的剪切黏度是油藏数值模拟、方案设计和动态预测的重要参数<sup>[1-2]</sup>。由于聚合物溶液在多孔介质中的流变性与宏观流变性有很大差异, 用流变仪测得的流变特性并不能反映聚合物溶液在地下的流变特性, 所以聚合物水溶液在孔隙介质中的流变特性是极其复杂的。国内很多学者对此展开了研究<sup>[1-9]</sup>。目前聚合物黏度的计算主要是采取宏观黏度或经验公式, 研究聚合物溶液在多孔介质中的流变性, 对于准确分析聚合物在油藏中的渗流规律具有重要意义。为此, 笔者通过室内试验, 测定了聚合物通过多孔介质的流变性, 可为现场方案设计提供依据。

## 1 试验研究

### 1.1 试验设备与流程

试验设备: 岩心管、电子天平、磁力搅拌器、高压计量泵、真空泵和毛细管黏度计, 其流程如图1所示。



1. 平流泵工作液; 2. 平流泵; 3, 13. 水容器; 4, 11. 流体过滤器;  
5. 六通阀; 6. 岩心夹持器; 7. 量筒; 8. 夹持器出口; 9. 夹持器  
环压口; 10. 压力表; 12. 油容器; 14. 管线

图1 驱替试验流程

### 1.2 试验条件

根据现场注聚合物质量浓度选取典型聚合物质量浓度, 采用岩心填砂模型, 选取不同粒径的砂粒制作高渗模型, 岩心管填砂模型长度为30 cm, 岩心管直径2.5 cm, 试验参数见表1, 用蒸馏水配制聚合物溶液。

表1 试验参数

试验编号	岩心渗透率/ $\mu\text{m}^2$	孔隙度	聚合物质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	聚合物黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$
1	3.07	0.36	1 000	48.20
2	3.06	0.37	1 500	150.26
3	5.02	0.39	1 000	48.20
4	5.06	0.38	1 500	150.26
5	10.01	0.43	1 000	48.20
6	10.02	0.42	1 500	150.26
7	10.06	0.41	2 000	350.30

试验条件: 室温(25 °C)条件下恒速注入, 注入速

收稿日期: 2009-09-15; 改回日期: 2009-11-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“海上油田活性聚合物乳液驱油体系研究与应用技术”(编号: 2006AA09Z322)部分研究内容

作者简介: 张星(1978—), 男, 山东泰安人, 1999年毕业于重庆科技学院石油与天然气工程专业, 2006年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位, 现在胜利油田博士后科研流动站从事储层保护及渗流机理方面的研究。

联系方式: (0546)8552512, zhxhdpu@163.com

度为 2 mL/min, 试验标准参考 SY/T 6576—2003。

填充模型采用同一批石英砂, 为便于对比分析, 填充渗透率分别为 3、5、10  $\mu\text{m}^2$ , 填充渗透率与近似渗透率误差小于 3%。

### 1.3 试验步骤

1) 根据试验条件填充岩心, 饱和水, 测定其孔隙度等参数(见表 1);

2) 以恒定的流速注水, 测量岩心水相渗透率;

3) 以恒定的流速注入聚合物溶液, 记录注入聚合物溶液的体积与岩心两端的压力及流出流量, 测定不同驱替体积下的压力和聚合物黏度;

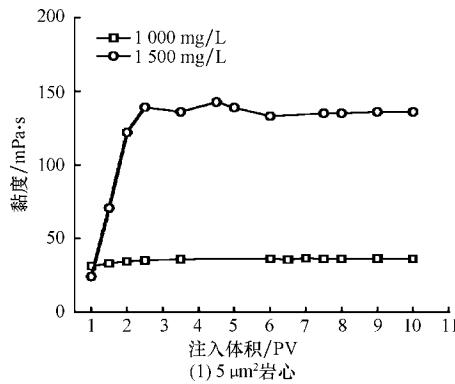


图 2 第一次注入聚合物体积与黏度关系曲线

从图 2 可以看出: 聚合物溶液通过相近渗透率岩心时, 质量浓度越高, 经过剪切后的黏度也越大, 由于质量浓度高, 聚合物吸附滞留越多, 渗透率下降大, 渗流阻力大, 质量浓度越高, 压力增加幅度越大; 当注入 3 PV 后, 聚合物吸附、捕集、滞留达到平衡, 聚合物剪切后黏度达到动态平衡, 黏度保持恒定。

#### 1.4.2 重复剪切影响

分别以 3、10  $\mu\text{m}^2$  的岩心为例进行试验, 所得剪切次数与黏度的关系如图 3 所示。

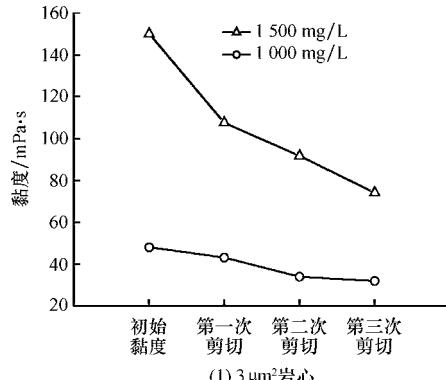


图 3 剪切次数与黏度的关系

4) 当注入 3 倍孔隙体积(PV)聚合物溶液时, 收集采出液, 将上述收集的聚合物溶液再次注入岩心 6 PV, 测定流出液黏度;

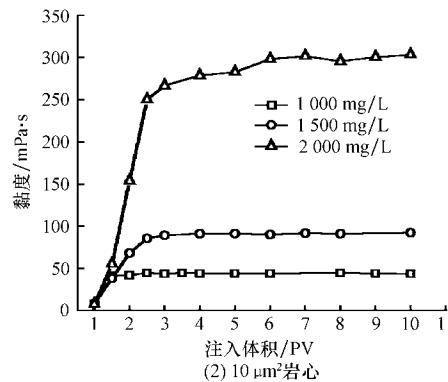
5) 再次收集流出的聚合物溶液, 注入岩心 5 PV, 测定产出最终聚合物溶液黏度;

6) 同一流速下, 后续水驱 10 PV。

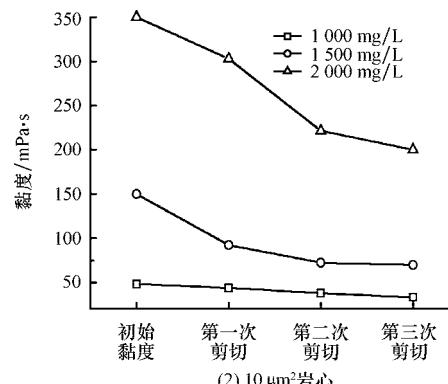
### 1.4 试验结果与分析

#### 1.4.1 第一次剪切后浓度影响

分别以 5、10  $\mu\text{m}^2$  岩心为例进行试验, 得到注入聚合物溶液体积与黏度的关系曲线, 见图 2。



从图 3 可以看出: 相同渗透率条件下, 注入孔隙体积与黏度呈指数衰减规律, 随着质量浓度的降低, 黏度降低速率减小, 质量浓度越高, 黏度损失速率大; 聚合物通过岩心后每次黏度均下降, 随着剪切次数的增加, 其黏度损失也增加; 聚合物溶液每受岩心剪切后, 黏度都有所降低, 第一次黏度损失最大, 平均为初始黏度的 10%~40%, 第二次黏度损失为第一次黏度的 15%~25%, 第三次黏度损失为第二次的黏度的 2%~20%, 黏度损失率下降; 经过三次剪切后, 质量浓度越低, 剪切后聚合物溶液黏度损失率越低。



其中1000 mg/L的聚合物溶液剪切后其黏度受渗透率影响较小,对渗透率不敏感,3、5、10  $\mu\text{m}^2$  黏度损失率为初始黏度的30%~33%。随着质量浓度的增加,黏度损失率增加,剪切黏度对渗透率的敏感性增加,多孔介质对聚合物的每次剪切最终达到一种平衡并趋于稳定。

## 2 结果讨论

**渗透率影响** 岩心试验表明,不同渗透率的岩心剪切后黏度均减小,且随着渗透率的增加黏度损失率减小。当聚合物溶液流过高渗透多孔介质时,在相同的渗流速度下,它所受到的阻力较小,即作用于聚合物分子的剪切应力较小,其分子链拉断的可能性较小,因而其降解的程度也就较小。反之,渗透率越低,孔隙半径越小,孔隙结构也越复杂,在相同的渗流速度下其流动阻力也就越大,即所受到的剪切应力就越大,聚合物分子链就越易拉断,其降解作用就越强。实际储层孔隙结构复杂,其剪切降解率比试验条件下的高,因此在现场注聚过程中,应当根据储层孔隙结构对聚合物进行剪切实验,确定最佳注聚合物质量浓度,减少聚合物溶液的黏度损失率,提高经济效益。

**质量浓度影响** 聚合物溶液的质量浓度是影响聚合物溶液流变性的主要因素之一,聚合物溶液具有明显的增稠特性,其质量浓度越高非牛顿特性越明显,渗流剪切过程中的损失率越高,低质量浓度对于一定范围内渗透率的岩心剪切不敏感。

## 3 结论

- 1) 试验表明,聚合物经过岩心并剪切降解后其表观黏度均下降。
- 2) 同一渗透率条件下,随着质量浓度的增加,聚合物溶液剪切后的表观黏度增加。当聚合物质量浓度低时,黏度剪切降解对渗透率不敏感,随着质量浓度的增加,黏度损失率增加。
- 3) 聚合物经过多孔介质时发生复杂的剪切效应,其流变性是自身黏弹性、多孔介质复杂性等因素的综合反映,其大小取决于各种效应的耦合作用。

## 参 考 文 献

- [1] 唐放,宋考平,刘丽,等.聚驱后续水驱阶段驱替特征模型的建立及验证[J].石油钻探技术,2009,35(5):105-108.
- [2] 靳金荣,赵冬云,赵成义.聚合物驱油技术在大港油田的应用[J].石油钻探技术,2002,30(5):62-63.
- [3] 张宏方,王德民,王立军.不同类型聚合物溶液在多孔介质中的渗流规律[J].新疆石油地质,2002,23(5):404-407.
- [4] 谢峰,皇海权.聚合物溶液高速流经岩心后的粘度损失研究[J].油田化学,1997,14(3):277-279.
- [5] 陈铁龙,唐金星,彭克宗,等.聚丙烯酰胺溶液的地下流变特性研究[C]//冈秦麟.化学驱油论文集:“八五”三次采油成果汇编.北京:石油工业出版社,1998:112-119.
- [6] 佟曼丽.聚合物稀溶液在多孔介质中的粘弹效应[J].天然气工业,1987,7(1):64-71.
- [7] 王德民,程杰成,杨清彦.粘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(5):45-51.
- [8] 夏惠芬.粘弹性聚合物溶液的渗流理论及其应用[M].北京:石油工业出版社,2002:53-55.
- [9] 夏惠芬,岳湘安,曹广胜,等.渗流过程中聚合物溶液的流变性[J].大庆石油学院学报,2000,24(3):26-29.

[审稿 苏玉亮]

## Investigation Polymer Rheology in Porous Media

Zhang Xing<sup>1</sup> Li Zhaomin<sup>2</sup> Xu Linjing<sup>3</sup>

(1. Oil Production Technology Research Institute, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257000, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China; 3. College of Oil & Gas Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Polymer viscosity is one of the important input parameters for reservoir development, dynamic predication and numerical simulation, etc. There are great difference between polymer's macroscopic viscosity and shear viscosity when it is flowing through porous media. In order to improve viscosity in designing polymer flood process, through experiments simulation method, various permeability and polymer rheology of different concentration were systematically investigated via core equipment. Results show that viscosity declines when polymer is flowing through porous media. The low permeability, the low viscosity is. Loss factors of polymer decline with increasing permeability. At same permeability, the macroscopic viscosity after shearing increases with the increase of concentration of polymer. With low concentration, viscosity with shear degradation is not sensitive to permeability. With the increase of concentration, viscosity loss factor increases, and viscosity and shear number decline.

**Key words:** polymer; porous media; rheology; heterogeneity; shear thinning