

·油气采收率·

# 剪切方式对疏水缔合聚合物溶液性能的影响

薛新生<sup>1,2</sup>, 张健<sup>1,2</sup>, 舒政<sup>3</sup>, 任路<sup>4</sup>, 赵继发<sup>5</sup>, 崔素红<sup>6</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.西南石油大学石油工程学院,四川成都 610500; 4.中国石油渤海钻探工程有限公司工程技术研究院,天津 300457; 5.中国石油渤海钻探国际工程分公司,天津 300457; 6.天津石油职业技术学院,天津 301607)

**摘要:**疏水缔合聚合物溶液流变性能与剪切方式密切相关。采用吴茵搅拌器和近井地带剪切模拟装置,分别对质量浓度为 1 750 mg/L 的疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液进行剪切,获得了相近的表现粘度,但其粘弹性和非牛顿性均不同。对比剪切前后的疏水缔合聚合物溶液发现,近井地带剪切模拟装置的剪切未改变溶液粘弹性和非牛顿性的“质”,仅仅改变了其粘弹性和非牛顿性的“量”;吴茵搅拌器剪切不仅改变了溶液的粘弹性和非牛顿性的“量”,而且改变了溶液粘弹性和非牛顿性的“质”。同时,采用不同剪切方式获得的溶液,其相对分子质量及其分布、构建阻力系数和残余阻力系数、增油降水能力均不同。因此,采用吴茵搅拌器,模拟驱油聚合物在近井地带的剪切是不符合油藏实际情况的,该方法仅能够获得与预期表现粘度相近的溶液,但是却无法同步模拟溶液的其他流变性能;采用近井地带剪切模拟装置剪切更符合矿场实际。

**关键词:**剪切方式 疏水缔合聚合物 粘弹性 非牛顿性 近井地带剪切模拟装置 吴茵搅拌器

**中图分类号:** TE357

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)01-0059-04

多年来,吴茵搅拌器剪切<sup>[1]</sup>一直是中外模拟驱油聚合物在近井地带剪切的主要方法之一<sup>[2-9]</sup>,1993版石油行业标准中曾采用<sup>[10-11]</sup>,但随着对驱油机理的进一步认识,这种方法的局限性也逐渐暴露出来,2008版石油行业标准<sup>[12]</sup>采用毛细管剪切的方法将其替代。为了研究模拟驱油聚合物在近井地带剪切的最佳方法,近年来许多学者研究了岩心剪切<sup>[13]</sup>、压差剪切<sup>[8]</sup>、射孔炮眼实验装置剪切<sup>[14]</sup>等方法,笔者曾比较了这些方法与实际近井地带剪切在剪切方式、剪切距离、剪切强度、剪切介质等方面的差异<sup>[15]</sup>,并在此基础上研制了近井地带剪切模拟装置,开展了剪切方式对疏水缔合聚合物溶液流变性能的影响研究,以期从多角度、多层次更贴近近井地带油藏实际情况,从而完善近井地带剪切模拟方法。

## 1 实验设备与溶液配制

主要实验设备包括 LV-DV-III 布氏粘度计、乌氏粘度计、Physica MCR301 流变仪、DISK-BI-200sm 激光光散射仪、近井地带剪切模拟装置<sup>[15]</sup>和吴茵搅拌器。

聚合物溶液配制步骤包括:①首先在 45 °C 条件下配制质量浓度为 5 000 mg/L 的聚合物母液,然后稀释至质量浓度为 1 750 mg/L 的目标液,即疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液;②采用近井地带剪切模拟装置在强度为 20 m<sup>3</sup>/(m·d) 的条件下对目标液剪切,取 10 倍孔隙体积后的聚合物溶液备用;③将①中的目标液用吴茵搅拌器在 I 档(转速为 3 500 r/min)条件下剪切 20 s 后备用。

实验用水为渤海某油田注聚矿场配注用水。如无特殊说明,疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液质量浓度均为 1 750 mg/L,测试或实验温度为 65 °C。

## 2 不同剪切方式下聚合物溶液性能

### 2.1 流变性

用布氏粘度计测试未剪切溶液的粘度为 495.1 mPa·s,采用近井地带剪切模拟装置以 20 m<sup>3</sup>/(m·d) 的强度剪切后,溶液粘度为 164.3 mPa·s;经吴茵搅拌器 I 档剪切 20 s 后,溶液粘度为 164.1 mPa·s。尽管采用不同剪切方式获得 AP-P4 溶液的表现粘度相近,但是不同剪切方式对溶液粘弹性,包括储能

收稿日期:2012-11-26。

作者简介:薛新生,男,工程师,博士,从事提高采收率相关研究。联系电话:18910879902,E-mail: xuexsh@cnooc.com.cn。

基金项目:国家“十二五”重大专项课题“海上稠油化学驱油技术”(2011ZX05024-004)。

模量和损耗模量的影响不同(图1)。无论何种剪切方式,与未剪切相比,均导致了溶液的粘弹性降低,表现为储能模量和损耗模量均不同幅度的降低,但是,采用近井地带剪切模拟装置剪切获得的AP-P4溶液其储能模量和损耗模量的损失幅度比采用吴茵搅拌器方式降低的幅度小。由剪切前后AP-P4溶液粘弹性曲线的形状和斜率(图1)可以明显看出,近井地带剪切模拟装置对AP-P4溶液的粘弹性影响较小,剪切对曲线的斜率无明显的影响,因此这种剪切方式对AP-P4溶液粘弹性的影响仅仅是粘弹性“量”的影响,但是由采用吴茵搅拌器剪切获得的AP-P4溶液的粘弹性曲线可见,这种剪切方式对粘弹性“量”的影响远大于近井地带剪切模拟装置的剪切,而且吴茵搅拌器剪切对AP-P4溶液的粘弹性造成了“质”的影响,表现为AP-P4溶液剪切前后粘弹性曲线的斜率发生了明显的变化。

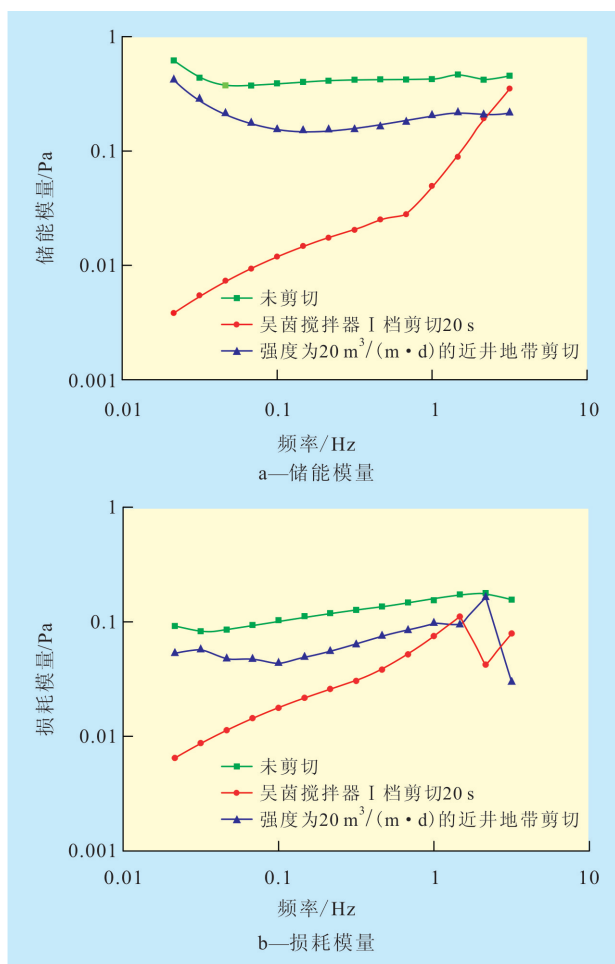


图1 剪切方式对疏水缔合聚合物AP-P4溶液粘弹性的影响

疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液在经历不同剪切方式后,使用 Physica MCR301 流变仪,测试其流变特性,对数据在剪切速率为  $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  和  $1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$  时按照幂率流体本构方程进行拟合。由拟合结果

(表1)可见,尽管不同剪切方式所获得流体的表观粘度相近,但是由于剪切方式的差异,导致其在不同剪切速率下表现出的幂率指数和稠度系数不同。近井地带剪切模拟装置剪切获得的流体与未剪切的原液的幂率指数相近,说明剪切未明显改变其非牛顿性,但是经吴茵搅拌器剪切获得的流体,其幂率指数降低,说明其非牛顿性是增强的。由于其非牛顿性的差异,将使其在流速变化时所体现出来的瞬时粘度不等,这与对粘弹性的影响规律相同。2种剪切方式均导致稠度系数降低,稠度系数反映了剪切速率为  $1 \text{ s}^{-1}$  时的粘度,由表1可见,近井地带剪切后溶液稠度系数降低的幅度与粘度降低的幅度接近,吴茵搅拌器剪切后溶液的稠度系数比近井地带剪切获得溶液的低,这与幂率指数的差异相关,幂率指数越高,粘度与剪切速率的斜率越小,稠度系数越高。

表1 不同剪切方式对疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液非牛顿性的影响

剪切方式	剪切速率为 $7.34 \text{ s}^{-1}$ 时的粘度/( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	剪切速率为 $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$		剪切速率为 $1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$	
		幂率指数	稠度系数	幂率指数	稠度系数
未剪切	595.1	0.87	56.94	0.91	60.2
强度为 $20 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ 的近井地带剪切	164.3	0.89	15.78	0.93	16.57
吴茵搅拌器 I 档剪切 20 s	164.1	0.71	13.13	0.78	13.8

### 2.2 特性粘数

由表2可见,不同剪切方式均造成了疏水缔合聚合物 AP-P4 特性粘数的损失,但是近井地带剪切模拟装置剪切造成的特性粘数损失比吴茵搅拌器剪切产生的特性粘数损失大,说明近井地带剪切模拟装置的剪切获得的疏水缔合聚合物溶液的平均相对分子质量比采用吴茵搅拌器获得的疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液平均相对分子质量小。

表2 不同剪切方式对疏水缔合聚合物 AP-P4 特性粘数的影响

剪切方式	溶液流出时间/s	溶剂流出时间/s	特性粘数
未剪切	89.68	48.4	1 925.34
强度为 $20 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ 的近井地带剪切	73.03	48.4	1 245.54
吴茵搅拌器 I 档剪切 20 s	76.77	48.4	1 406.74

### 2.3 水动力学体积

采用动态光散射方法测试了疏水缔合聚合物 AP-P4 溶液在不同剪切方式剪切前后分子水动力学体积的变化。由测试结果(图2)可见,剪切使水动力学体积较大的分子(粒径为  $2\ 500 \text{ nm}$ )比例变

少,这与特性粘数的测试结果是吻合的,但可以明显发现近井地带模拟装置的剪切对水动力学体积大的分子影响大,主峰由2 500 nm左右转移到了400 nm处,原来400 nm处的峰则未移动,仅仅是与2 500 nm剪切后的颗粒叠加增强,原来60 nm处的峰也被移动到了40 nm附近;而吴茵搅拌器剪切后水动力学体积较大的分子仍然较多地保留在1 500 nm左右,剩下的分布在200和60 nm及其附近,说明吴茵搅拌器剪切对所有分子都是有影响的,由于60 nm峰仍然存在,因此可以认为吴茵搅拌器剪切对足够小的分子影响较小,吴茵搅拌器剪切后获得的溶液是高强度剪切后的溶液与未剪切溶液的混合物,这些均导致二者相对分子质量的平均值及其分布不同。总之,2种方式剪切后,疏水缔合聚合物AP-P4溶液分子的水动力学体积分布明显不同,这必将影响溶液的粘弹性、渗流等性能。上述结果说明动态光散射获得的测试结果与特性粘数测试结果有对应关系。

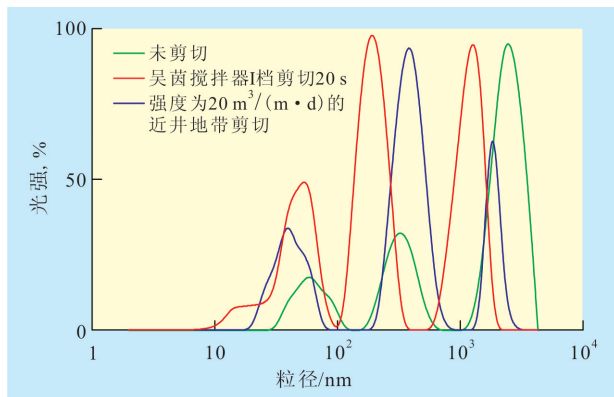


图2 不同剪切方式对疏水缔合聚合物AP-P4溶液分子水动力学体积的影响

### 2.4 构建阻力系数和残余阻力系数能力

实验结果(表3)表明,2种剪切方式均使疏水缔合聚合物AP-P4溶液构建阻力系数和残余阻力系数的能力降低,尽管剪切后表观粘度相近,但不同的剪切方式造成相关溶液构建阻力系数和残余阻力系数的能力降低幅度不同,近井地带剪切模拟装置的剪切对缔合聚合物溶液构建阻力系数和残余

剪切方式	粘度/(mPa·s)	阻力系数	残余阻力系数
未剪切	595.1	192.61	17.93
强度为20 m³/(m·d)的近井地带剪切	164.3	126.88	25.33
吴茵搅拌器I档剪切20 s	164.1	79.95	11.69

阻力系数能力的降低幅度较小,吴茵搅拌器剪切对疏水缔合聚合物AP-P4溶液的相关性能影响大,该特性在进行驱油实验时必然造成提高采收率幅度不同。

### 2.5 驱油效率

在多年的采收率物理模拟过程中,曾经发现一个有趣的现象,即不同的聚合物溶液性能,除了驱油效率不同外,其降低产出液含水率的漏斗情况也不同,而这种情况在一定程度上反映了未来聚合物驱的见效速度快慢和有效周期长短以及增油降水的能力。含水率降低漏斗大小与聚合物驱效果相关,因此,通过叠加法计算了含水率降低漏斗的体积,计算公式为

$$A_{\text{funnel}} = \frac{(f_{w\max} + f_{wp})(V_{PV\max} - V_{PV1})}{2} - \sum_i \frac{(f_{wi+1} + f_{wi})}{2} (V_{PV_{i+1}} - V_{PV_i}) \quad (1)$$

式中:  $A_{\text{funnel}}$  为含水率降低漏斗的体积, PV%;  $f_{w\max}$  为聚合物驱后水驱阶段最高含水率,%, 该值通常大于95;  $f_{wp}$  为开始聚合物驱时的含水率,%;  $V_{PV\max}$  为聚合物驱后水驱阶段最高含水率时的累积注入孔隙体积倍数;  $V_{PV1}$  为开始聚合物驱时累积注入孔隙体积倍数;  $f_{wi+1}$  和  $f_{wi}$  分别为第  $i+1$  和第  $i$  个数据点的产出液含水率,%;  $V_{PV_{i+1}}$  和  $V_{PV_i}$  分别为第  $i+1$  和第  $i$  个数据点的累积注入孔隙体积倍数。

驱油实验所用岩心长度、宽度、高度分别为4.5, 4.5, 30 cm, 其高、中、低渗透率分别为  $3.130 \times 10^{-3}$ ,  $1.476 \times 10^{-3}$  和  $718 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 对应的孔隙度分别为32.7%, 32.3%和30.7%, 驱替速度为3 m/d。由实验结果(图3)可见,对于不同剪切方式下获得的疏水缔合聚合物溶液,聚合物驱增加的采收率以及含水率降低漏斗的体积均不同。原因是不同剪切方式导致疏水缔合聚合物溶液的粘弹性发生了变化。

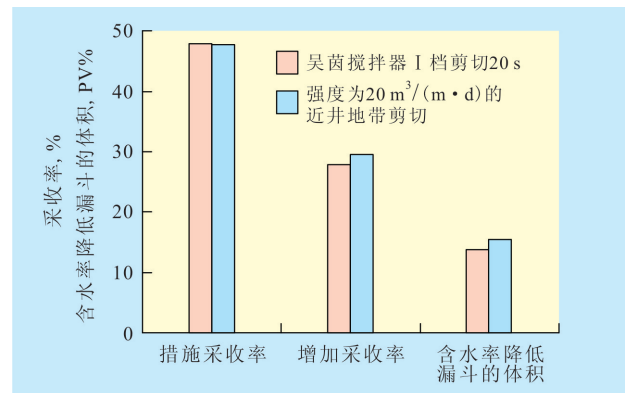


图3 不同剪切方式对疏水缔合聚合物溶液驱油性能的影响



### 3 结论

尽管通过不同的剪切方式可以获得表观粘度相近的疏水缔合聚合物溶液,但是由于剪切方式差异,相关溶液的粘弹性与非牛顿性明显不同,其中近井地带剪切模拟装置的剪切仅仅是改变了其粘弹性“量”的大小,表现为剪切前后溶液的粘弹性仅仅是绝对值的变化,而未改变溶液粘弹性和非牛顿性的“质”,表现为粘弹性曲线剪切前后仍然是平行的。从表观粘度与剪切速率的对数曲线看,近井地带剪切模拟装置剪切前后溶液的斜率,即幂率指数未发生明显变化,仅仅是表征曲线位置的稠度系数发生了变化,说明近井地带剪切也仅仅是改变了缔合聚合物溶液的表观粘度,未改变溶液的非牛顿性;吴茵搅拌器剪切则既改变缔合聚合物溶液粘弹性和非牛顿性的“量”,也改变其“质”。

不同剪切方式所获得溶液的相对分子质量大小及其分布或聚集体分布、溶液构建阻力系数和残余阻力系数的能力、增油降水的能力均不同。

由此可见,采用合理的方法模拟聚合物溶液在近井地带的剪切非常必要。仅仅考虑溶液的表观粘度相近是不够的,比较之下,近井地带剪切模拟方法更接近实际。

#### 参考文献:

[1] 邵振波,周吉生,孙刚,等.部分水解聚丙烯酰胺驱油过程中机械降解研究——分子量、粘度及相关参数的变化[J].油田化学,2005,22(1):72-77.

- [2] 雷巧会,田根林,郑德温,等.聚合物粘度剪切损失与恢复的研究[J].西安石油学院学报:自然科学版,1997,12(6):33-35.
- [3] 施雷庭,贾天泽,叶仲斌,等.剪切作用对疏水缔合聚合物溶液分子聚集行为的影响[J].油气地质与采收率,2011,18(2):49-51.
- [4] 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.
- [5] 薛新生,郭拥军,马军隆,等.离子对缔合聚合物溶液黏度剪切保留率影响研究[J].石油钻采工艺,2008,30(4):96-99.
- [6] 闫文华,杨桃,程玉琪,等.剪切聚合物对二类油层驱油效果的影响[J].大庆石油学院学报,2007,31(3):136-138.
- [7] 闫文华,卢祥国,高振环.聚合物驱产出水配制的聚合物溶液抗剪切能力[J].大庆石油地质与开发,1996,20(4):38-41.
- [8] 叶仲斌,彭杨,施雷庭,等.多孔介质剪切作用对聚合物溶液粘弹性及驱油效果的影响[J].油气地质与采收率,2008,15(5):59-62.
- [9] 周成裕,陈馥,黄磊光,等.一种高温抗剪切聚合物压裂液的研制[J].钻井液与完井液,2008,25(1):67-68.
- [10] 庞宗威,程杰成,高秀兰,等.SY/T 5862—93 驱油用丙烯酰胺类聚合物性能测定[S].北京:石油工业出版社,1993.
- [11] 韩明,张健,向问陶,等.Q/HS 2032—2006 海上油田驱油用丙烯酰胺类耐盐聚合物的性能指标和检测方法[S].天津:塘沽渤海石油印刷厂,2007.
- [12] 孙刚,祝仰文,李长庆,等.SY/T 5862—2008 驱油用聚合物技术要求[S].北京:石油工业出版社,2008.
- [13] 杨怀军,张杰,张景春.缔合聚合物溶液岩芯剪切流变行为研究[J].西南石油大学学报,2007,29(1):102-105.
- [14] 邓卫国.化学驱射孔炮眼聚合物粘度损失研究[J].特种油气藏,2008,15(增刊):69-71.
- [15] 薛新生.海上驱油聚合物使用性能的合理评价方法研究[D].北京:中海油研究总院,2011.

编辑 刘北羿

欢迎广大科技人员踊跃投稿