

超高分三元共聚物流变特性及驱油性能

祝仰文

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:常规水解聚丙烯酰胺在高温高盐油藏下粘度较低,将2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸耐温抗盐单体引入聚丙烯酰胺主链制备超高分三元共聚物是提高聚合物耐温抗盐特性的有效方法。对比研究常规水解聚丙烯酰胺和含2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸单体的超高分三元共聚物的基本物化性能、流变特性及驱油效果。在模拟水总矿化度为32 868 mg/L的条件下,与常规水解聚丙烯酰胺相比,超高分三元共聚物流体有效直径增加30%以上,分子链更加舒展,网络结构更加完整,粘度提高1倍以上。流变特性研究表明,超高分三元共聚物剪切流变方程中增稠系数提高2倍,假塑性指数降低22%,因此,超高分三元共聚物具有更高的粘弹性,在地层运移时产生的拉伸粘度提高1倍以上。双管物理模拟驱油实验结果表明,常规水解聚丙烯酰胺提高采收率仅为15.7%,超高分三元共聚物提高采收率达24.1%,驱油效果更好,具有良好的应用前景。

关键词:高温高盐油藏 超高分三元共聚物 剪切流变 拉伸流变 驱油效果

中图分类号:TE357.46⁺¹

文献标识码:A

Study on rheology and oil displacement properties of ultra high molecular weight terpolymer

ZHU Yangwen

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The conventional hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) flooding agent has very low viscosity in high temperature and high salinity reservoir. By introducing 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS) monomer to the PAM backbone, the ultra-high molecular weight (UHMW) terpolymer was synthesized. This is an effective way to improve the temperature resistance and the salt tolerance performance of the polymer. The basic physicochemical properties, rheological properties and oil displacement effect of conventional HPAM and UHMW terpolymer with AMPS monomer were studied. Compared with the conventional HPAM, the effective diameter of UHMW terpolymer was increased by more than 30% at 32 868 mg/L salinity of the simulated water. The molecular chain was more stretched and the network structure were more complete, and the viscosity was more than doubled. Rheological studies show that the thickening coefficient of the UHMW terpolymer shear rheological equation increased by 2 times, and the power-law index decreased by 22%. Therefore, the UHMW terpolymer has higher viscoelasticity, and the tensile viscosity caused by its migration in the formation was more than doubled. The double-sand-filling-tube model experiment shows that the conventional HPAM can only enhance oil recovery by 15.7%, while the UHMW terpolymer can enhance oil recovery by 24.1%. The UHMW terpolymer has better oil displacement effect and has good prospect of application.

Key words: high temperature and high salinity reservoir; UHMW terpolymer; shear rheology; tensile rheology; oil displacement effect

根据进行化学驱的难易程度,将胜利油田油藏分为3类。一类和二类油藏由于温度和矿化度相对

较低,现场化学驱效果显著,截至2017年,化学驱累积增油量已超过 2.950×10^4 t。三类油藏由于温度、

收稿日期:2018-08-15。

作者简介:祝仰文(1973—),男,山东鄄城人,高级工程师,博士,从事三次采油方面研究。联系电话:13954617716, E-mail: dzyzyw@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011-003)。

矿化度及钙镁离子质量浓度均较高,常规部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)在该类油藏条件下增粘性及耐温抗盐性均较差^[1],无法满足三类油藏化学驱技术要求。

目前,新型耐温抗盐驱油剂的研发主要有2大方向,一是对聚丙烯酰胺进行改性,合成改性聚丙烯酰胺,二是利用小分子或大分子间的自组装形成超分子驱油剂^[2]。对常规聚丙烯酰胺进行改性是当前研究的热点,改性方法是在合成过程中引入刚性环状基团^[3-4]、疏水缔合基团^[5-6]或者耐温抗盐基团^[7]和丙烯酰胺共聚。其中,刚性环状基团最常引入的是N-乙烯基吡咯烷酮,但由于其单体空间位阻较大,且竞聚率和丙烯酰胺差别较大,合成的共聚物相对分子质量较低(小于 $1\,000\times 10^4$)^[8],很难满足高温高盐油藏需要;疏水缔合基团最常引入的是含有长链烷基的烯丙基类单体,同样具有较大的空间位阻,合成的疏水缔合聚合物相对分子质量也较低(小于 $2\,000\times 10^4$),虽然通过单体之间的缔合作用,聚合物具有较高的增粘性和较大的流体力学体积,但聚合物的注入性能相对常规聚丙烯酰胺稍差^[9];因此引入耐温抗盐基团和丙烯酰胺共聚是最有前景的方向之一,目前最常引入的耐温抗盐单体是2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS),近10 a关于丙烯酰胺和AMPS共聚的合成方法研究较多^[10],对于合成共聚物的流变学特性尤其是剪切流变特性及拉伸流变特性的研究,以及流变特性对驱油性能的影响研究较少。为此,选择常规HPAM和超高分三元共聚物P(AM-AA-AMPS),并对比2种聚合物的基本物化性能,重点研究P(AM-AA-AMPS)剪切流变性和拉伸流变特性及驱油效果,以期适用于胜利油田三类油藏聚合物的研发和应用提供借鉴。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验仪器主要包括:磁力搅拌器及转子、乌氏粘度计、水解度测定仪,美国布鲁克海文BI-200SM动静态光散射仪,安东帕MCR301流变仪、哈克CABER拉伸流变仪,德国蔡司生产EVO18Special Edition扫描电镜,英国QUORUM公司生产的PP3000T冷冻传输制备系统,室内物理模拟实验评价装置。

实验用聚合物为法国爱森絮凝剂有限公司生产的常规HPAM和P(AM-AA-AMPS),AMPS质量分数为15%。

实验用水为胜利油田三类油藏模拟水,其总矿化度为 $32\,868\text{ mg/L}$,钙镁离子质量浓度为 874 mg/L 。

1.2 实验方法

聚合物溶液配制 取一定质量的聚合物干粉,用胜利油田三类油藏模拟水配制质量浓度为 $5\,000\text{ mg/L}$ 的母液,熟化1 d,稀释成不同质量浓度的目标溶液。

聚合物基本物化性能评价 利用水解度测定仪和乌氏粘度计,测试聚合物水解度和特性粘度,并计算其粘均相对分子质量,同时利用流变仪测试聚合物溶液质量浓度为 $1\,500\text{ mg/L}$ 时的粘度。

聚物流体有效直径测试 取胜利油田三类油藏模拟水配制的常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)聚合物母液,用胜利油田三类油藏模拟水稀释成质量浓度为 500 mg/L 的溶液,在实验温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 下,用动静态光散射仪测试其流体力学有效直径。

聚物流变特性分析 取胜利油田三类油藏模拟水配制的母液,稀释成质量分数为0.2%的聚合物溶液,在实验温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,利用安东帕MCR301流变仪测试溶液的剪切流变特性,同时取聚合物母液,利用哈克CABER拉伸流变仪测试溶液拉伸流变特性。

聚合物微观聚集形态表征 取质量浓度为 $1\,500\text{ mg/L}$ 的聚合物溶液,放入液氮冷冻30 s以上,把样品放入PP3000T冷冻传输制备系统的样品制备室,进行升华和喷金,最后把样品放入扫描电镜中观察其微观聚集形态。

聚合物驱油效果评价 首先对岩心饱和油(原油为东辛营八区块脱水原油,地层温度下原油粘度为 $202\text{ mPa}\cdot\text{s}$),然后水驱至含水率为95%,注入东辛营八区块地层模拟水配制的常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)聚合物溶液,最后进行后续水驱至含水率为100%。实验温度为 $84\text{ }^\circ\text{C}$ 。注入模拟水总矿化度为 $30\,643\text{ mg/L}$,钙镁离子质量浓度为 $1\,551\text{ mg/L}$ 。岩心模型为双管石英砂充填岩心,长度为30 cm,直径为2.5 cm;岩心渗透率为 $1\,000\sim 3\,000\text{ mD}$;注入段塞尺寸为0.3 PV;注入速度为 3 m/d ;注入聚合物溶液质量分数为0.15%。

2 实验结果与分析

2.1 基本物化性能及流体力学有效直径评价

聚合物的基本物化性能参数包括很多方面,其

中对驱油性能影响较大的是聚合物的水解度、特性粘数、相对分子质量和粘度,因此,首先对常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)聚合物的上述基本物化性能参数进行测试,然后利用动静态光散射仪分别测试其流体力学有效直径。

由基本物化性能评价结果(表1)可知,相对于常规HPAM,一方面,由于P(AM-AA-AMPS)引入了质量分数为15%的AMPS单体,AMPS单体具有较大的分子体积,其结构中含有磺酸根基团,在高温下可以抑制酰胺基的水解速度,降低钙镁离子对共聚物主链的影响,使得聚合物在较高的矿化度下仍能保持较大的水动力学体积,而不会发生相分离,同时AMPS可取代常规HPAM中部分羧酸根,能够进一步降低聚合物水解度,进而降低分子中羧酸根离子质量分数,较低质量分数的羧酸根离子在高温条件下,不容易和盐水中的钙镁离子结合产生絮凝沉淀,聚合物抗钙镁离子能力大幅提高。另一方面,在引入AMPS单体的基础上又大幅度提高了共聚物的相对分子质量至 $2\ 900\times 10^4$ 以上,使聚合物分子在水溶液中的流体力学有效半径增加30%以上,因此通过2种作用的相互叠加,在胜利油田三类油藏条件下,P(AM-AA-AMPS)增粘能力大幅提高,质量分数为0.15%的P(AM-AA-AMPS)粘度相对于常规HPAM提高了1倍以上。

表1 常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)聚合物基本物化性能及流体力学有效直径对比

Table 1 Comparison of basic physicochemical properties and effective diameter of hydrodynamics of conventional HPAM and P(AM-AA-AMPS)

聚合物类型	AMPS 质量分 数/%	水解 度/%	特性 粘数/ (mL·g ⁻¹)	相对分 子质 量/10 ⁴	流体力 学有效 直径/nm	粘度/ (mPa·s)
常规HPAM	0	23.5	2 550	2 100	128.5	7.8
P(AM-AA-AMPS)	15	13.2	3 150	2 910	168.5	17.1

2.2 流变特性分析

聚合物在地层运移过程中主要存在2种流变,一种是剪切流变,即在地层剪切场作用下,聚合物剪切粘度的变化;另一种是拉伸流变,即聚合物在地层由孔隙向喉道运移过程中由于孔径变化产生的拉伸场而引起的拉伸粘度的变化,因此良好的驱油性能需要聚合物既具有良好的剪切流变特性,又具有良好的拉伸流变特性。

2.2.1 剪切流变特性

取质量分数为0.2%的常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)溶液,考察剪切速率为1~300 s⁻¹条件下,

2种聚合物的剪切粘度随剪切速率发生的变化,由此拟合剪切流变曲线(图1)。

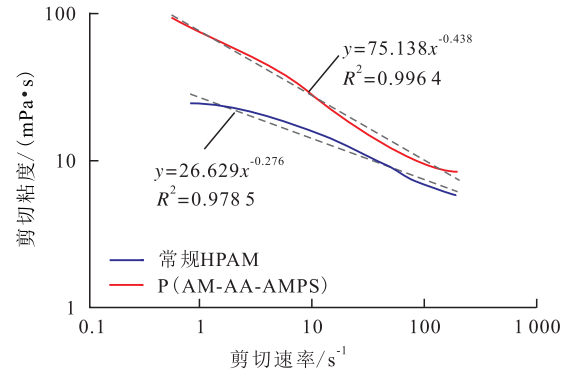


图1 常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)剪切流变特性对比

Fig.1 Comparison of shear rheological properties of conventional HPAM and P(AM-AA-AMPS)

由图1可知,在胜利油田三类油藏条件下,2种聚合物的剪切流变曲线均表现出“剪切稀释”假塑性流体特性,通过对流变曲线的拟合得出,2种聚合物剪切粘度和剪切速率的剪切流变方程均呈现幂函数关系^[11]

$$\eta = k\gamma^{n-1} \quad (1)$$

式中: η 为粘度,mPa·s; k 为聚合物的稠度系数; γ 为剪切速率,s⁻¹; n 为聚合物的假塑性系数。

对于假塑性流体,式(1)中 k 和 n 分别代表流体的不同性质, k 值越大,聚合物增稠能力越强,具有更高的粘性, n 值越小,聚合物分子链在水溶液中越舒展,舒展的分子链在水溶液中相互排斥和缠绕作用更强,不容易卷曲成团,流体力学有效半径更大,具有更好的弹性。

由常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)剪切流变方程可知,常规HPAM的 k 值为26.629, n 值为0.724;P(AM-AA-AMPS)的 k 值为75.138, n 值为0.562。常规HPAM的 k 值较小, n 值较大,表明该聚合物在胜利油田三类高盐高钙镁离子模拟水中增稠能力较差,同时分子链卷曲比较严重。P(AM-AA-AMPS)的 k 值相对于常规HPAM大幅提高2倍以上,且 n 值降低22%,表明引入AMPS单体的基础上大幅度提高相对分子质量后,聚合物在胜利油田三类油藏模拟水中的粘性和弹性均大幅提高,有利于扩大聚合物在地层中的波及能力。

2.2.2 拉伸流变特性

取质量分数为0.5%的常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)溶液,测试其拉伸粘度随拉伸应变的变化情况。

由图2可知,在相同拉伸应变条件下,2种聚合物均具有较高的拉伸粘度,主要原因是2种聚合物

均具有较高的相对分子质量,高相对分子质量聚合物由孔隙向喉道运移时,由于孔径的突变,分子链会由相互缠绕的混乱状态产生瞬时拉伸取向,由热力学第二定律可知,在整个运移过程中,分子链混乱度降低,聚合物整体熵值减小,而熵值减小需要外部对其做功,所做的功会产生一个附加压力,从而使聚合物注入压力增高。

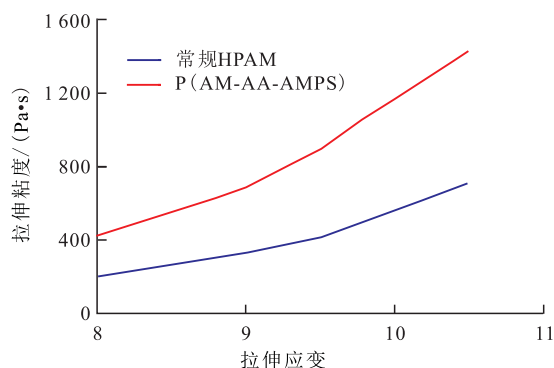


图2 常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)拉伸流变特性对比

Fig.2 Comparison of tensile rheology of conventional HPAM and P(AM-AA-AMPS)

由图2可知,相对于常规HPAM,P(AM-AA-AMPS)在相同应变下拉伸粘度提高1倍以上,表明由于P(AM-AA-AMPS)流体力学半径大,分子链间相互排斥作用强,在水溶液中分子链更加混乱,熵值更大,在由孔隙向喉道运移时,能够产生更高的附加压力,因此在地层中发生运移时,P(AM-AA-AMPS)具有更强的扩大波及能力。

2.3 微观聚集形态

目前对溶液微观聚集形态的研究主要有原子力显微镜法^[12]、透射电镜法^[13]和扫描电镜法^[14]。笔者采用冷冻蚀刻和扫描电镜联用的方式研究聚合物溶液的微观聚集形态,通过液氮快速冷冻聚合物溶液,使溶液瞬间固化,锁定溶液的水化分子形态,再通过扫描电镜对固化后的结构进行观察,可以最大限度地看到该体系在水溶液中真实的分布情况。

由图3可知,在胜利油田三类高矿化度和高钙镁离子质量浓度的模拟水中,由于常规HPAM中含

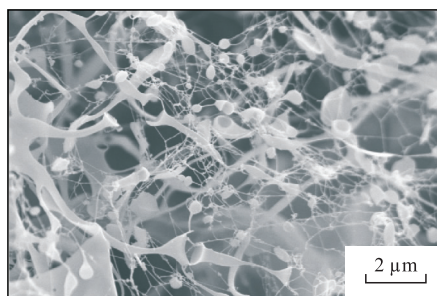


图3 常规HPAM微观聚集形态

Fig.3 Micro-aggregation morphology of conventional HPAM solution

有较多的羧酸根阴离子,在遇到金属阳离子时,通过静电引力相互作用,降低了常规HPAM分子表面的电荷密度,减弱了羧酸根阴离子间的排斥作用,同时由于金属阳离子的存在,也会压缩羧酸根离子周围的双电层,从而使分子链产生较严重的卷曲,因此常规HPAM在盐水中粘度较低,增稠能力也较差。

由图4可知,虽然P(AM-AA-AMPS)分子链中仍然有部分的COO⁻基团,该基团在和盐水中钠离子、钙镁离子作用过程中同样使分子链产生卷曲,但由于AMPS中R-SO₃⁻耐温抗盐基团的存在,减弱了盐对聚合物分子双电层的压缩,使分子链仍能够保持较舒展的特性,因而聚合物具有较高的粘弹性,而舒展的分子链之间相互排斥后具有更高的混乱度,因此通过地层孔喉时拉伸取向增加幅度更大,使聚合物同时具有较高的拉伸粘度。

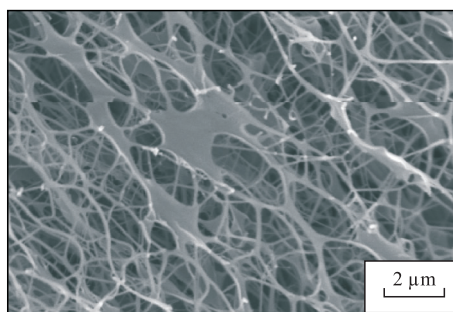


图4 P(AM-AA-AMPS)微观聚集形态

Fig.4 Micro-aggregation morphology of P(AM-AA-AMPS)

2.4 室内驱油效果

为模拟胜利油田三类油藏东辛营八区块油藏条件,通过填砂管双管物理模拟实验,研究注入常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)后的驱替曲线和分流量曲线。由图5可知,由于P(AM-AA-AMPS)具有更好的剪切流变特性和拉伸流变特性,因此在地层中运移时,能够产生更高的剪切粘度和拉伸粘度,两者叠加作用,导致其注入压力比常规HPAM高30%以上,高的注入压力使P(AM-AA-AMPS)波及能力更强。由图6a可以看出,水驱后注入常规HPAM,高渗透管流量降低速度更慢,且注入一段时间后,高渗透管流量最低值占总流量的65%,调剖能力和扩大波及能力较弱。由图6b可知,水驱后注入P(AM-AA-AMPS),高渗透管流量降低速度更快,且注入一段时间后,高渗透管流量最低值占总流量的48.5%,调剖能力及扩大能力较强^[15],注聚合物后常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)最终含水漏斗最低值分别为35%和23%。由聚合物驱油效果对比(表2)可知,在水驱结果基本相当的情况下,常

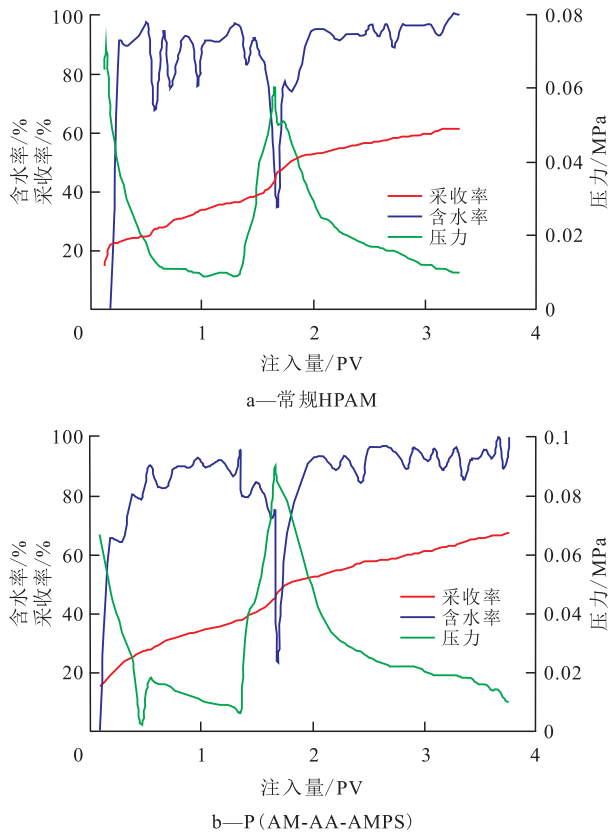


图5 常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)驱替曲线
Fig.5 Displacement curves of conventional HPAM and P(AM-AA-AMPS)

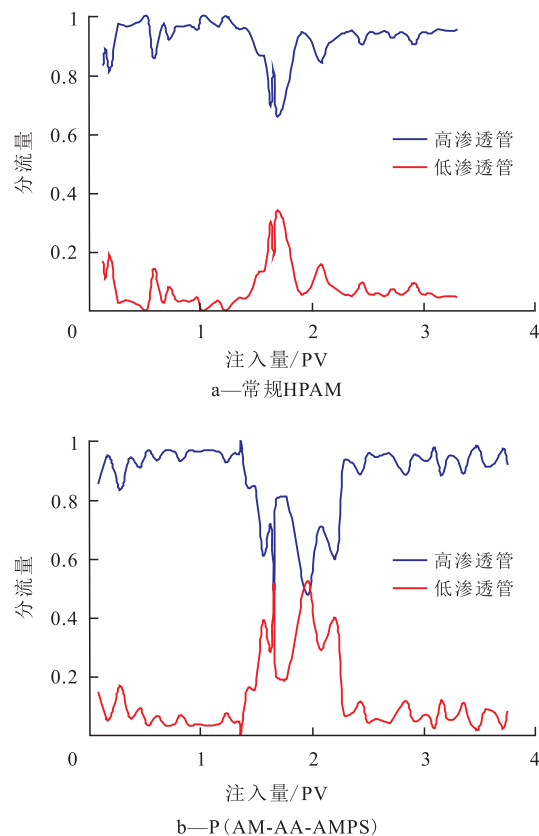


图6 常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)分流量曲线
Fig.6 Flow rate curves of conventional HPAM and P(AM-AA-AMPS)

表2 常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)驱油效果对比
Table2 Comparison of displacement effect of conventional HPAM and P(AM-AA-AMPS)

聚合物类型	聚合物粘度/ (mPa·s)	水驱采 收率/%	最终采 收率/%	聚合物驱提 高采收率/%
常规HPAM	6.9	45.4	61.1	15.7
P(AM-AA-AMPS)	15.1	43.0	67.1	24.1

规HPAM最终采收率为61.1%，聚合物驱提高采收率仅为15.7%；P(AM-AA-AMPS)最终采收率为67.1%，聚合物驱提高采收率达24.1%，P(AM-AA-AMPS)驱油效果更好。

3 结论

选取胜利油田三类油藏模拟水配制常规HPAM和P(AM-AA-AMPS)2种聚合物溶液,对其基本物化性能、流变特性、微观聚集形态及驱油效果进行研究。结果表明,P(AM-AA-AMPS)具有更大的分子流体力学尺寸和更强的抗钙镁离子能力。P(AM-AA-AMPS)一方面通过增大相对分子质量使聚合物分子在水溶液中的流体力学有效直径相对于常规聚合物增加30%以上,同时引入的AMPS不易与盐水中的钙镁离子结合产生絮凝沉淀,抗钙镁离子能力大幅提高,粘度相对于常规HPAM提高1倍以上。P(AM-AA-AMPS)同时改善聚合物的剪切流变特性和拉伸流变特性。P(AM-AA-AMPS)在高矿化度水中分子链更舒展,相对于常规HPAM,剪切流变方程中k值提高2倍以上,n值降低22%,具有更高的粘弹性,因此由孔隙向喉道运移过程中,分子链产生拉伸取向时,拉伸粘度提高1倍以上。P(AM-AA-AMPS)在地层中扩大波及能力更强,驱油效果更好。同时P(AM-AA-AMPS)具有较高的剪切粘度和拉伸粘度,水驱后注入P(AM-AA-AMPS),注入压力提高30%以上,扩大波及能力及调剖能力更强,最终提高采收率达24.1%,驱油效果更好,具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 张栋,吴文祥,任佳潍,等.Ca²⁺与Mg²⁺对聚合物黏度影响及其增黏方法[J].大庆石油地质与开发,2016,35(1):105-108.
ZHANG Dong, WU Wenxiang, REN Jiawei, et al. Influences of Ca²⁺ and Mg²⁺ on the viscosity of the polymer solution and thickening method[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(1): 105-108.

[2] 徐辉,曹绪龙,孙秀芝,等.三次采油用小分子自组装超分子体系驱油性能[J].油气地质与采收率,2017,24(2):80-84.

- XU Hui, Cao Xulong, SUN Xiuzhi, et al. Study on oil displacement performance of self-assembled small-molecule supramolecular system for EOR [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(2): 80-84.
- [3] 崔士红. 具有N-乙烯基吡咯烷酮结构的水溶性两亲共聚物的合成与性质研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
CUI Shihong. Synthesis and properties of water-soluble amphiphilic copolymers containing N-vinyl pyrrolidone [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [4] 刘鹏. 半刚性链水溶性温敏型聚合物的设计、合成及其相行为研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
LIU Peng. Design, synthesis and phase behavior of semi-rigid water-soluble thermo-responsive polymer [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [5] 徐辉. 超高分子缔合聚合物溶液特性及驱油效果研究[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(2): 78-83.
XU Hui. Solution characteristics and oil displacement efficiency of an ultrahigh molecular weight association polymer [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(2): 78-83.
- [6] 季岩峰, 曹绪龙, 郭兰磊, 等. 聚合物疏水单体与表面活性剂对聚/表二元体系聚集体的作用[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(4): 95-101.
JI Yanfeng, CAO Xulong, GUO Lanlei, et al. Influence of hydrophobic groups of polymer and surfactant on aggregation of polymer/surfactant binary system [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(4): 95-101.
- [7] 赵方园, 毛炳权, 伊卓, 等. 丙烯酸酯/2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸共聚物合成的逐级放大及其性能的研究[J]. *石油化工*, 2013, 42(1): 34-37.
ZHAO Fangyuan, MAO Bingquan, Yi Zhuo, et al. Stepwise scaling up of acrylamide/2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid copolymer synthesis and its properties [J]. *Petrochemical Technology*, 2013, 42(1): 34-37.
- [8] 叶仲斌, 苟光俊, 苟少华, 等. 丙烯酸酯四元共聚磺酸盐的合成及性能研究[J]. *化学研究与应用*, 2012, 24(10): 1560-1564.
YE Zhongbin, GOU Guangjun, GOU Shaohua, et al. Synthesis and properties for a acrylamide tetra-copolymer sulfonate [J]. *Chemical Research and Application*, 2012, 24(10): 1560-1564.
- [9] CHAUVETEAU G. Molecular interpretation of several different properties of flow of coiled polymer solutions through porous media in oil recovery conditions [C]. San Antonio: 1981 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1981: 1-14.
- [10] 赵方园, 毛炳权, 伊卓, 等. 绝热反应合成AM/AMPS共聚物及其性能[J]. *精细化工*, 2012, 29(12): 34-37.
ZHAO Fangyuan, MAO Bingquan, Yi Zhuo, et al. Synthesis of AM/AMPS copolymer by adiabatic reaction and its performance [J]. *Fine Chemicals*, 2012, 29(12): 34-37.
- [11] 程杰成, 沈兴海, 袁士义, 等. 新型梳形抗盐聚合物的流变性[J]. *高分子材料科学与工程*, 2004, 20(4): 119-121.
CHENG Jiecheng, SHEN Xinghai, YUAN Shiyi, et al. Study on rheology of polyacrylamide copolymer used in enhanced oil recovery [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2004, 20(4): 119-121.
- [12] 张瑞, 叶仲斌, 罗平亚. 原子力显微镜在聚合物溶液结构研究中的应用[J]. *电子显微镜学报*, 2010, 34(5): 475-480.
ZHANG Rui, YE Zhongbin, LUO Pingya. The atomic force microscopy study on the microstructure of the polymer solution [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2010, 34(5): 475-480.
- [13] 侯吉瑞, 刘中春, 张淑芬, 等. 碱对聚丙烯酰胺的分子形态及其流变性的影响[J]. *物理化学学报*, 2013, 19(3): 256-259.
HOU Jirui, LIU Zhongchun, ZHANG Shufen, et al. Effect of alkali on molecular configuration of polymer and its rheologic behavior [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2013, 19(3): 256-259.
- [14] 冯玉军, 罗传秋, 罗平亚, 等. 疏水缔合水溶性聚丙烯酰胺的溶液结构的研究[J]. *石油学报: 石油加工*, 2001, 17(6): 39-44.
FENG Yujun, LUO Chuanqiu, LUO Pingya, et al. Study on characterization of microstructure of hydrophobically associating water-soluble polymer in aqueous media by scanning electron microscopy and environmental scanning electron microscopy [J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2001, 17(6): 39-44.
- [15] 张颖苹. 稠油油藏聚合物驱剖面反转现象室内实验[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(6): 111-114.
ZHANG Yingping. Laboratory experiment of profile inversion regulation in heavy-oil reservoir with polymer flooding [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(6): 111-114.

编辑 单体珍