

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.201605012

新型两性离子共聚物(AM/DEPS)的合成与评价

王琳, 杨小华, 林永学, 何剑

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:海上油田在应用聚合物驱油技术时, 现有聚合物在海水中黏度低、不易溶解, 不能满足海洋平台在线配制驱替液的要求。为此, 以丙烯酰胺(AM)和甲基丙烯酰氧乙基-N,N-二乙基丙磺酸盐(DEPS)为共聚单体, 采用反相乳液聚合合法合成了新型两性离子共聚物(AM/DEPS)。通过红外光谱和氢核磁共振谱分析了共聚物(AM/DEPS)的结构, 结果表明, 该共聚物分子链中含有丙烯酰胺、DEPS链节, 两性离子单体DEPS被引入到了共聚物分子链中。考察了单体DEPS摩尔分数、乳化剂、引发剂、反应温度等对共聚物特性黏数的影响, 确定最佳共聚反应条件为: 反应温度25~30℃, 引发剂用量0.08%, 乳化剂与油相质量比1:8, 单体DEPS摩尔分数2.5%。共聚物(AM/DEPS)的抗盐增黏性及溶解性评价结果表明, 该共聚物乳液在海水中可快速溶解, 且具有优异的抗盐增黏效应, 能满足海洋平台上用海水直接在线配制驱替液的要求。

关键词: 聚合物驱; 两性离子共聚物; 反相乳液聚合; 特性黏数; 表观黏度

中图分类号: TE357.46⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2016)05-0072-07

The Synthesis and Evaluation of a New Zwitterionic Copolymer(AM/DEPS)

WANG Lin, YANG Xiaohua, LIN Yongxue, HE Jian

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: In polymer flooding in offshore oil fields, the existing polymer cannot meet the requirements of online flooding fluid formulation on offshore platforms due to its low viscosity and poor solubility in seawater. A new type of zwitterionic copolymer (AM/DEPS) was synthesized through inverse emulsion polymerization with acrylamide (AM) and methyl acryl oxyloxyethyl-N,N-diethyl-CHAPSO(DEPS) as the comonomer. The structure of the copolymer was analyzed by IR and HNMR spectrum. Analysis results showed that the copolymer molecular chain contains acrylamide, DEPS links and the DEPS zwitterionic monomer is introduced into the molecular chain of the copolymer. The effects of monomer DEPS mole fraction, emulsifiers, initiator and the reaction temperature on the intrinsic viscosity of the copolymer were analyzed. The optimum copolymerization reaction condition were determined: reaction temperature around 25-30℃, initiator percentage 0.08%, emulsifier to oil phase mass ratio 1:8 and DEPS monomer mole fraction 2.5%. The salt thickening and solubility of the copolymer were evaluated and it showed that the copolymer emulsion could be quickly dissolved in seawater with excellent viscosifying effect, which could meet the requirement of flooding fluid online formulation with seawater for offshore platforms.

Key words: polymer flooding; zwitterionic copolymer; inverse emulsion polymerization; intrinsic viscosity number; apparent viscosity

聚合物驱油的注入流程庞大、复杂, 且常用聚合物的溶解时间长, 而海上油田由于生产平台空间小、海水矿化度高, 在应用聚合物驱油技术时, 要求聚合物具备快速溶解与抗盐的特性^[1-2]。疏水缔合聚合物具有优异的抗盐增黏性能, 但是溶解性较差, 限制了其在海上油田聚合物驱油中的大规模应用^[3-5]。两性

收稿日期: 2015-07-27; 改回日期: 2016-06-03。

作者简介: 王琳(1970—), 女, 河北吴桥人, 1992年毕业于山东师范大学化学系, 1995年获山东大学有机合成专业硕士学位, 2004年获中国科学院物理化学专业博士学位, 高级工程师, 主要从事油田化学剂方面的研究工作。E-mail: wanglin_sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“抗高温抗钙钻井液关键处理剂及体系研究”(编号: P15012)部分研究内容。

离子聚合物因其高分子链上同时带有正负电荷基团而具有独特性质,如反聚电解质效应、等电点现象等^[6-8],在石油勘探开发中可作为三次采油用聚合物驱油剂^[9-10]、钻井液用增黏剂和包被剂^[10-12]、水处理用絮凝剂等^[13]。王玉峰等人^[14]以丙烯酰胺、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸与甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵为共聚单体,合成了共聚物(AM/AMPS/DMC),其在 NaCl 溶液中的黏度随 NaCl 浓度增加,虽有一定程度下降,但保持率达 93% 以上。该类两性离子共聚物中的正负电荷处于不同链节上,由于各单体存在竞聚率的差异,难以得到完全电中性的两性离子共聚物,分子链的扩展会受到 pH 值等的影响^[15]。正负电荷基团处于同一单体上的两性离子聚合物,即盐类聚合物^[6],主要通过同时带有正、负电荷的单体自聚或者与非离子单体共聚得到,可在更宽的 pH 值范围内保持自身结构的稳定,最显著的特点是在盐溶液中具有黏度不降反升的反聚电解质效应,使其日益受到相关领域学者的高度重视^[6,16-18]。

笔者以自制的两性离子单体甲基丙烯酰氧乙基-N,N-二乙基丙磺酸盐(DEPS)和丙烯酰胺(AM)为共聚单体,采用反相乳液聚合的方法,制备了新型两性离子共聚物(AM/DEPS),该共聚物中正负电荷基团处于同一单体上,具有显著的反聚电解质效应,并且两性离子单体 DEPS 的氮原子上带有 2 个乙基,具有较大的空间位阻,减小了分子内成盐的趋势,使其更易溶解,能够满足海上油田在生产平台上用海水直接进行在线配制聚合物驱替液的要求。

1 实验材料与方法

1.1 主要原料与仪器

单体:丙烯酰胺(AM),工业品;甲基丙烯酰氧乙基-N,N-二乙基丙磺酸盐(DEPS),自制。引发剂:过硫酸铵、四甲基乙二胺,均为分析纯。乳化剂:Span 80、Tween 80,均为化学纯。5 号白油,工业品。氯化钠、无水氯化钙、六水合氯化镁和无水乙醇均为分析纯。去离子水。

IR 200 型红外光谱仪;Avance-600MHz 型核磁共振波谱仪;Brookfield DV-III 黏度计;TGA-SD-TA 型热分析仪。

1.2 两性离子共聚物(AM/DEPS)的合成与纯化

在装有搅拌器、温度计、冷凝器、通氮气管和恒

压滴液漏斗的四口反应瓶中,加入白油、Span 80 和 Tween 80,边搅拌边通氮除氧;将 AM 和 DEPS 溶于去离子水中,通氮气除氧后滴加到四口反应瓶中,在 25~30 °C 下高速搅拌使其乳化均匀,引发聚合,反应 4 h 后,得到乳白色、均一、流动性好的共聚物(AM/DEPS)乳液;加入无水乙醇,析出白色的共聚物(AM/DEPS)固体,经去离子水、丙酮两次溶解、沉淀除去未反应的单体,在 50 °C 温度下抽真空干燥,即得到纯化的共聚物(AM/DEPS)。

1.3 共聚物黏度的测定

称取合成的共聚物乳液 0.6 g,滴加 0.05 g 10% OP-10 水溶液,加入 0.5 mol/L 的 NaCl 水溶液 100 mL,用电磁搅拌器搅拌 30 min,配成质量浓度为 2.0 g/L 的共聚物盐水溶液,用逐渐稀释方法,采用毛细管黏度计(乌氏)测量其在 25 °C 下的特性黏数,采用 Brookfield DV-III 黏度计测量共聚物溶液在 25 °C 下的表观黏度。

2 实验结果与分析

2.1 共聚物(AM/DEPS)的结构表征

2.1.1 红外光谱

图 1 是用 IR 200 型红外光谱仪测得的共聚物(AM/DEPS)中单体 DEPS 摩尔分数为 4.0% 时的红外光谱图。由图 1 可以看出:3 420 cm^{-1} 的强吸收峰为共聚物中 AM 链节上 $-\text{CONH}_2$ 基团中 N—H 的不对称伸缩振动峰;3 199 cm^{-1} 的吸收峰为 N—H 的对称伸缩振动峰;2 930 cm^{-1} 的吸收峰是甲基和亚甲

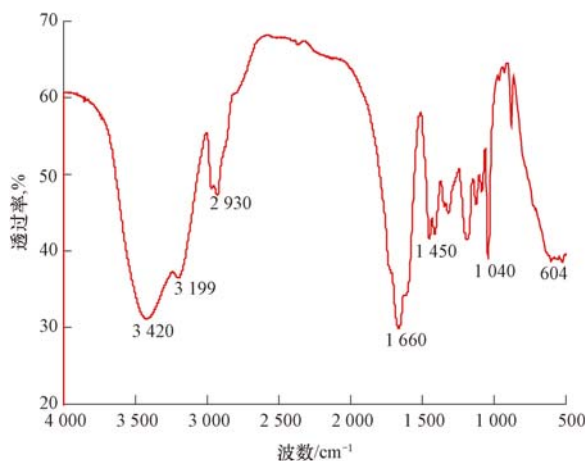


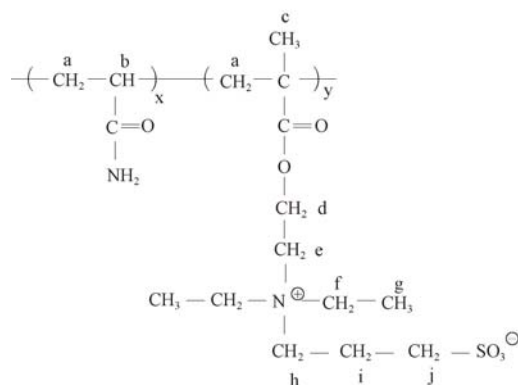
图 1 共聚物(AM/DEPS)的红外图谱

Fig. 1 The infrared spectrum of copolymer(AM/DEPS)

基上 C—H 的伸缩振动吸收峰; $1\,450\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰是 C—H 键变形振动吸收峰; $1\,660\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰是 AM 链节上—CONH₂ 基团中 C=O 键的伸缩振动峰; $1\,194\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,040\text{ cm}^{-1}$ 是—SO₂—O—的特征吸收带, 其中 $1\,194\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为磺酸根负离子—SO₃⁻ 中 S=O 的伸缩振动峰, $1\,040\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为磺酸根负离子—SO₃⁻ 中—S—O—的伸缩振动峰, 从而确定共聚物(AM/DEPS)中有 AM、DEPS 链节。

2.1.2 核磁共振图谱

图 2 是用 Avance-600MHz 型核磁共振波谱仪



测得的共聚物(AM/DEPS)的氢核磁共振谱图。由图 2 可以看出, 共聚物(AM/DEPS)链节单元中共有 12 种特征氢原子, 因单体 DEPS 在共聚物中含量较少, 其特征氢原子的峰较弱。其中, $\delta 1.0$ 附近的多重峰是 DEPS 链节中 CH₃(c 和 g)的化学位移, $\delta 1.4$ 和 $\delta 1.5$ 附近的多重峰是高分子主链上多个 CH₂(a)的化学位移, $\delta 2.0 \sim 2.1$ 是分子主链上 CH(b)的化学位移, $\delta 3.1 \sim 3.6$ 的多个多重峰是 DEPS 链节中与 N、O、S 原子相连的多个 CH₂(d, e, f, h 和 j)的化学位移。可见, 共聚物(AM/DEPS)分子链中含有丙烯酰胺、DEPS 链节, 两性离子单体 DEPS 被引入到了分子链中。

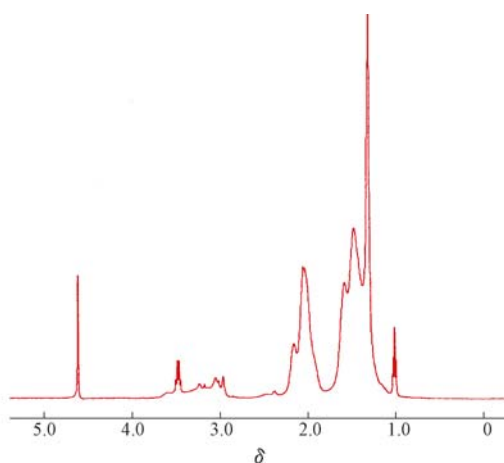


图 2 共聚物(AM/DEPS)的氢核磁共振图谱

Fig. 2 ¹H NMR spectrum of copolymer(AM/DEPS)

2.1.3 热重分析

图 3 是用 TGA-SDTA 型热分析仪测得的共聚物(AM/DEPS)的热失重曲线。由图 3 可见: 升温过程中有 4 个质量下降阶段。167 °C 之前为第 1 阶段, 该阶段质量约降低 1.8%, 失去的质量是共聚物中的水分, 共聚物没有分解; 167~283 °C 是第 2 阶段, 质量约降低 9.9%, 说明共聚物中低相对分子质量的成分挥发或有部分链段分解; 283~400 °C 为第 3 阶段, 质量约降低 35.2%, 表明共聚物开始分解; 400 °C 以上为第 4 阶段, 质量快速降低, 说明共聚物已裂解。测试结果表明, 共聚物(AM/DEPS)的热稳定性较好, 温度高于 283 °C 以后才开始分解。

2.2 共聚反应的影响因素

在整个乳液聚合反应中若反应条件不做特殊说明, 则引发剂用量为单体质量的 0.06%、DEPS 摩尔分数为 2%、反应温度 30 °C、反应时间 4 h、油水相

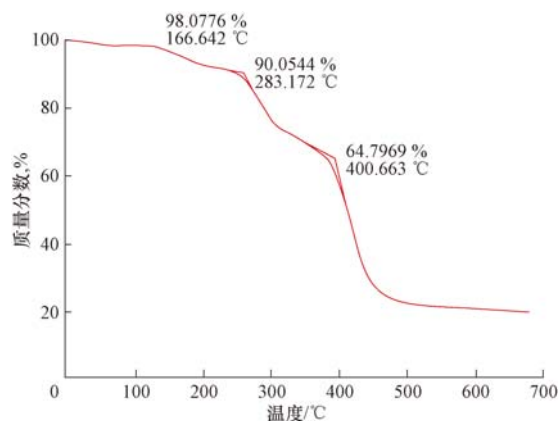


图 3 共聚物(AM/DEPS)的热失重曲线

Fig. 3 TG curve of copolymer(AM/DEPS)

质量比 2 : 5。

2.2.1 两性离子单体 DEPS 加量

图 4 是乳液聚合反应中 DEPS 不同加量条件下、生成的共聚物(AM/DEPS)在 0.5 mol/L NaCl

溶液中的表观黏度。由图 4 可以看出,随着单体中 DEPS 摩尔分数的增加,共聚物(AM/DEPS)溶液的表观黏度先升高,后逐渐降低。这是因为单体中 DEPS 摩尔分数增加后,共聚物(AM/DEPS)分子链上 DEPS 链节增多,磺酸根负离子之间的相斥作用使共聚物大分子链更为舒展,导致共聚物(AM/DEPS)溶液的表观黏度升高,即显示出两性离子共聚物的抗盐性能。但是随着单体中 DEPS 摩尔分数增大,会造成共聚物的相对分子质量降低,导致共聚物(AM/DEPS)溶液的表观黏度降低。当 DEPS 摩尔分数为 2.5% 时,共聚物(AM/DEPS)溶液的表观黏度最高,此时既可保证共聚物有较高的相对分子质量,又能保证在盐水中具有一定的增黏性。

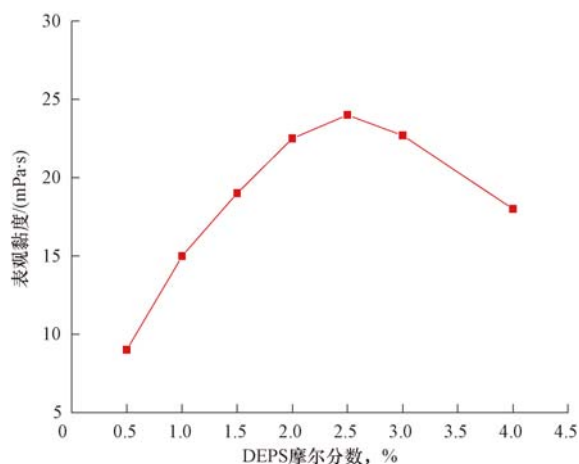


图 4 单体中 DEPS 摩尔分数对共聚物(AM/DEPS)溶液表观黏度的影响

Fig. 4 Effect of DEPS mole fraction in monomer on apparent viscosity of copolymer(AM/DEPS) solution

2.2.2 引发剂用量

图 5 是乳液聚合反应中不同引发剂用量条件下,生成的共聚物(AM/DEPS)在 0.5 mol/L NaCl 溶液中的特性黏数。由图 5 可以看出,随着引发剂用量增大,共聚物(AM/DEPS)溶液的特性黏数先急剧升高,随之缓慢下降。由聚合物特性黏数与其相对分子质量的关系式 Mark-Houwink 方程可知,聚合物溶液的特性黏数越大,聚合物的相对分子质量越大。因此,由图 5 可以看出,引发剂用量为 0.05%~0.20% 时,都能得到较高相对分子质量的共聚物。引发剂用量太少时,共聚反应不完全,随着引发剂用量增大,引发剂分解生成的自由基也相应增多,共聚反应的速度增大,但相对分子质量逐渐降低,这符合一般的自由基聚合反应规律,即在单体浓

度不变的情况下,随引发剂用量增大,平均每个增长自由基上的单体单元数减小,从而导致最终共聚物的相对分子质量降低,而且当引发剂用量大于 0.10% 后共聚反应的反应速度太快,温度不易控制,影响共聚效果,故引发剂用量选 0.08%。

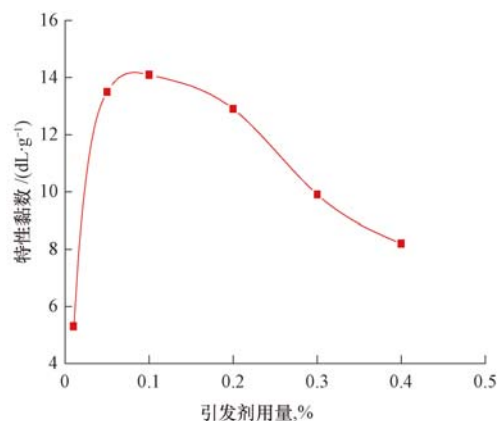


图 5 引发剂用量对共聚物(AM/DEPS)溶液特性黏数的影响

Fig. 5 Effect of polymerization initiator on intrinsic viscosity number of copolymer(AM/DEPS) solution

2.2.3 乳化剂

图 6 是乳液聚合反应中不同乳化剂亲水亲油平衡值(HLB 值)条件下,生成的共聚物(AM/DEPS)在 0.5 mol/L NaCl 溶液中的特性黏数。由图 6 可以看出,乳化剂的 HLB 值为 4.3~6.5 时,乳液聚合反应都能够顺利进行,而且乳化剂的 HLB 值对共聚物(AM/DMPS)水溶液特性黏数的影响不很明显。当所用乳化剂的 HLB 值大时,制备的共聚物乳液更易在水中分散,但 HLB 值过大时反相乳液聚合体系不稳定。

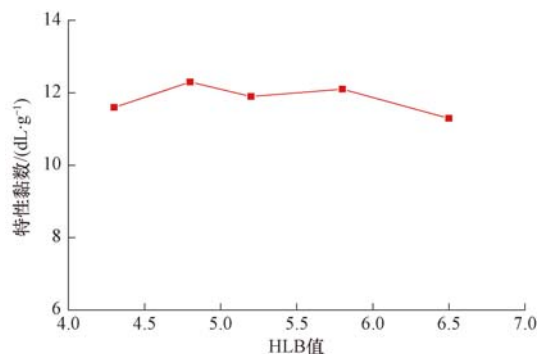


图 6 乳化剂 HLB 值对共聚物(AM/DEPS)溶液特性黏数的影响

Fig. 6 Effect of the emulsifier HLB value on intrinsic viscosity number of copolymer(AM/DEPS) solution

选用 HLB 值为 4.8 的复配乳化剂,在上述聚合反应条件下,采用不同复配乳化剂加量生成不同的共聚物(AM/DEPS),并对其溶液的特性黏数进行测试,结果见图 7。

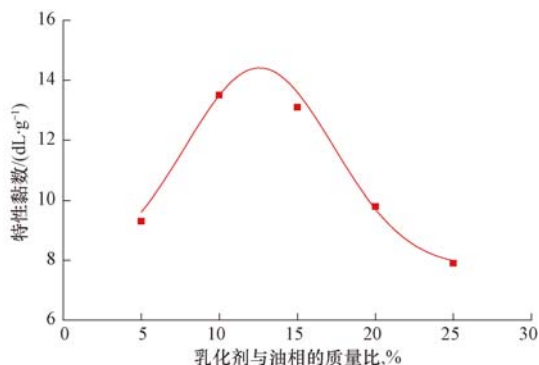


图 7 乳化剂加量对共聚物(AM/DEPS)溶液特性黏数的影响

Fig. 7 Effect of emulsifier amount on intrinsic viscosity number of copolymer (AM/DEPS) solution

由图 7 可以看出:随乳化剂加量增大,共聚物(AM/DMPS)溶液的特性黏数先增大后减小;当乳化剂的加量为油相质量的 12% 时,共聚物(AM/DMPS)溶液的特性黏数最大。由聚合物溶液特性黏数与其相对分子质量的关系可知:随乳化剂加量增大,共聚物(AM/DMPS)的相对分子质量也先增大后减小;当乳化剂的加量为油相质量的 12.5% 时,共聚物(AM/DMPS)的相对分子质量最大。这是因为当乳化剂加量太少时,形成的乳液不稳定,而当乳化剂加量过多时,乳化剂在油水相间形成的膜厚且坚固,影响反应单体的传递,且自由基链转移作用明显,阻碍共聚物分子链增长。

2.2.4 反应温度

图 8 是乳液聚合温度对共聚物(AM/DEPS)在 0.5 mol/L NaCl 溶液中特性黏数的影响。由图 8 可以看出:温度为 15~35℃ 时,反应温度对共聚物(AM/DEPS)溶液的特性黏数影响不大,也就是说对共聚物(AM/DEPS)相对分子质量的影响不大;随着反应温度的不断升高,引发剂的分解速率很大,由引发剂引发的链增长自由基的速率会升高,反应速率逐渐加大,同时温度升高有利于链转移发生,包括向引发剂、乳化剂、单体、溶剂等的链转移,导致共聚物(AM/DEPS)的相对分子质量降低,其溶液的特性黏数不断降低。因此,聚合反应温度控制在 20~30℃ 时可获得较高相对分子质量的共聚物。

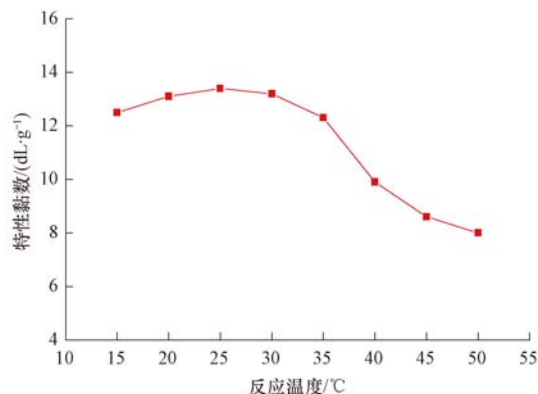


图 8 反应温度对共聚物(AM/DEPS)溶液特性黏数的影响

Fig. 8 Effect of polymerization temperature on intrinsic viscosity number of copolymer (AM/DEPS) solution

2.3 共聚物(AM/DEPS)在不同矿化度水中的表现黏度

将共聚物(AM/DEPS)加入到去离子水、海水(矿化度 33 g/L, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的质量浓度约 1 g/L)及 1 mol/L NaCl 溶液(矿化度 58.5 g/L)中,配制成不同质量浓度的溶液,测试其表现黏度,结果见图 9。

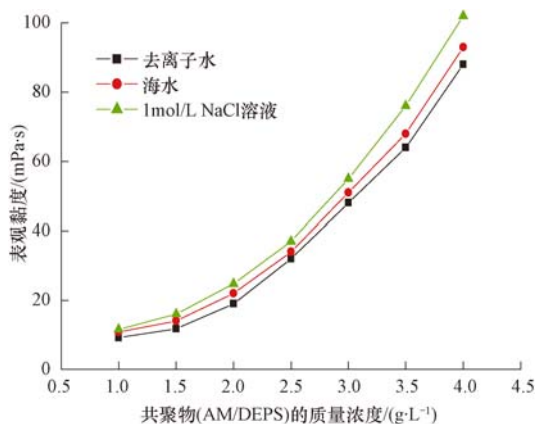


图 9 共聚物(AM/DEPS)与不同矿化度水配制的不同质量浓度溶液的表现黏度

Fig. 9 The apparent viscosity of copolymer (AM/DEPS) solution with different salinity

由图 9 可以看出:与一般丙烯酰胺类聚合物在盐溶液中表现黏度大幅度降低不同,共聚物(AM/DEPS)在海水和 1 mol/L NaCl 溶液中的表现黏度均大于在去离子水中的表现黏度,而且矿化度越高,表现黏度越大,在含有钙、镁等高价离子的海水中,亦表现出优异的反聚电解质效应。

将共聚物(AM/DEPS)加入到不同质量分数氯化钙溶液中,配制成质量浓度 2 g/L 的溶液,测试其表现黏度,结果为:在 4%、8% 和 20% CaCl_2 溶液中

的表观黏度分别为 23.5、26.0 和 32.5 mPa·s。由此可以看出:随氯化钙质量分数增大,相同质量浓度共聚物(AM/DEPS)溶液的表观黏度不降反升。其原因是小分子电解质的加入破坏了共聚物(AM/DEPS)中两性离子 DEPS 结构单元的分子内盐键,导致分子链扩张,流体力学体积增大,表观黏度升高,而且矿化度越高,分子链越伸展,其溶液的表观黏度越高。

2.4 共聚物(AM/DEPS)的溶解性

在转速 200 r/min 条件下分别向去离子水、海水、1 mol/L NaCl 溶液以及 1 mol/L CaCl₂ 溶液中加入共聚物(AM/DEPS),配制成质量浓度 4 g/L 的溶液,在溶解过程中定时快速测定溶液的表观黏度,结果见图 10。

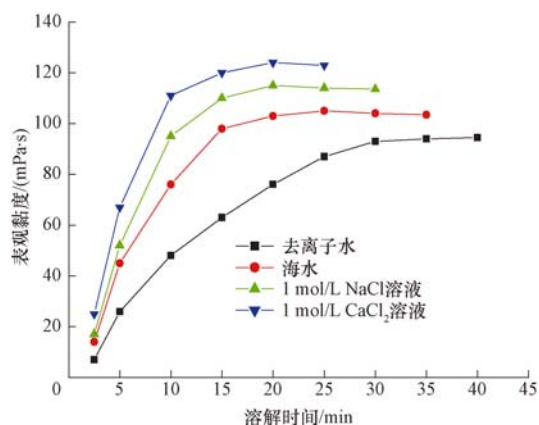


图 10 共聚物(AM/DEPS)在不同矿化度盐水中的溶解速率

Fig. 10 Dissolution rate of copolymer (AM/DEPS) in brine with different salinity

由图 10 可以看出:随着溶解时间增长,共聚物(AM/DEPS)在不同矿化度盐水中快速溶解,溶液的表观黏度逐渐增大,但用去离子水配制共聚物溶液的表观黏度增加缓慢。试验时发现,在 1 mol/L CaCl₂ 溶液中搅拌 10 min,共聚物(AM/DEPS)即接近完全溶解,而在去离子水中则需要 30 min 才能近完全溶解;在海水中搅拌约 15 min 共聚物(AM/DEPS)就可完全溶解。这说明共聚物(AM/DEPS)具有在海水中快速溶解、增黏的特性,可以在海上油田生产平台上用海水直接进行在线配制驱替液。

3 结 论

1) 采用反相乳液聚合方法,以丙烯酰胺(AM)

与甲基丙烯酰氧乙基-N,N-二乙基丙磺酸盐(DEPS)为单体,聚合反应得到了两性共聚物(AM/DEPS)。乳液聚合的最佳反应条件为:温度 25~30 ℃,复配乳化剂的 HLB 值 4.7~6.0,乳化剂与油相质量比 12.5%,单体 DEPS 的摩尔分数 2.5%,引发剂用量为单体质量的 0.08%。在最佳反应条件下共聚得到两性离子共聚物水溶液的特性黏数可达 14.5 dL/g。

2) 两性离子共聚物(AM/DEPS)可以溶于去离子水、海水及含钙盐水中,且随盐水矿化度增大,其溶液的表观黏度增大,且相同质量浓度的共聚物(AM/DEPS)在盐溶液中的表观黏度比在去离子水中高,抗钙镁等高价离子能力强,表现出明显的反聚电解质效应,可作为高矿化度油藏的驱油剂。

3) 共聚物(AM/DEPS)在一定矿化度盐水能快速溶解、增黏,且矿化度越高,溶解速度越快、溶液的表观黏度越高。在海水中搅拌约 15 min 就能完全溶解,并达到较高的表观黏度,适用于海上油田在生产平台上用海水直接进行在线配制驱替液。

参 考 文 献

References

- [1] 周守为. 海上油田高效开发技术探索与实践[J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 55-60.
ZHOU Shouwei. Exploration and practice of offshore oilfield effective development technology[J]. Engineering Science, 2009, 11(10): 55-60.
- [2] 周守为, 韩明, 向问陶, 等. 渤海油田聚合物驱提高采收率技术研究及应用[J]. 中国海上油气, 2006, 18(6): 386-389.
ZHOU Shouwei, HAN Ming, XIANG Wentao, et al. Application of EOR technology by means of polymer flooding in Bohai Oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(6): 386-389.
- [3] 王颖, 叶仲斌, 舒政, 等. 海上油田加快疏水缔合聚合物溶解方法研究[J]. 海洋石油, 2007, 27(2): 42-44.
WANG Ying, YE Zhongbin, SHU Zheng, et al. A study on accelerating the solubility of hydrophobically associate polymer for offshore oilfield[J]. Offshore Oil, 2007, 27(2): 42-44.
- [4] 滕大勇, 徐俊英, 滕厚开, 等. 用于海上油田化学驱的聚合物乳液性能评价[J]. 海洋石油, 2013, 33(3): 60-64.
TENG Dayong, XU Junying, TENG Houkai, et al. Evaluation on polymer emulsion for chemical flooding in offshore oilfield [J]. Offshore Oil, 2013, 33(3): 60-64.
- [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] 何晓燕,周文瑞,徐晓君,等.两性离子聚合物的合成及应用[J].化学进展,2013,25(6):1023-1030.
HE Xiaoyan, ZHOU Wenrui, XU Xiaojun, et al. Preparation and application of zwitterionic polymers[J]. Progress in Chemistry, 2013, 25(6): 1023-1030.
- [7] 张黎明.具有反聚电解质溶液行为的两性聚合物[J].高分子通报,1998(12):80-85.
ZHANG Liming. Zwitterionic polymers with antipolyelectrolyte behavior in solution[J]. Polymer Bulletin, 1998(12): 80-85.
- [8] 丁伟,毛程,韦兆水,等.甜菜碱型两性离子聚合物 P(AM-DMAAAS)的盐溶液性质[J].应用化学,2011,28(5):555-559.
DING Wei, MAO Cheng, WEI Zhaoshui, et al. Salt solution properties of a zwitterionic copolymer P(AM-DMAAAS)[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2011, 28(5): 555-559.
- [9] 李娟,王中华,胡群爱.水溶性两性聚合物的研究及其在油田开发中的应用[J].油田化学,2011,28(2):229-235.
LI Juan, WANG Zhonghua, HU Qun'ai. Application progress of water-soluble amphoteric polymers in oil field development[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(2): 229-235.
- [10] 齐从丽,马喜平,吴建军.新型两性离子聚合物在油田的应用现状[J].化工时刊,2004,18(6):20-24.
QI Congli, MA Xiping, WU Jianjun. Application actuality of a new ampholytic polyelectrolytes in the oil field[J]. Chemical Industry Times, 2004, 18(6): 20-24.
- [11] 廖辉,唐善法,田磊,等.两性离子聚合物在钻井液中的应用[J].精细石油化工进展,2013,14(2):22-24.
LIAO Hui, TANG Shanfa, TIAN Lei, et al. Application of amphoteric polymers in drilling fluids[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2013, 14(2): 22-24.
- [12] 罗霄,蒲晓林,李之军,等.两性离子聚合物降滤失剂 PADMS 的制备与室内性能评价[J].油田化学,2014,31(2):177-181.
LUO Xiao, PU Xiaolin, LI Zhijun, et al. Preparation and laboratory evaluation of amphoteric polymer PADMS as filtrate reducer[J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(2): 177-181.
- [13] 冉千平,黄荣华,马俊涛.两性聚电解质的合成及在水处理中的应用[J].油田化学,2001,18(2):188-192.
RAN Qianping, HUANG Ronghua, MA Juntao. Synthesis of polyampholytes and their uses in water treatments[J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(2): 188-192.
- [14] 王玉峰,胡惠仁,张红杰,等.油田用两性聚丙烯酰胺的合成及性能[J].精细石油化工,2006,23(5):6-10.
WANG Yufeng, HU Huiren, ZHANG Hongjie, et al. Synthesis and performance of AM/AMPS/DMC copolymer used as oil displacement agent[J]. Speciality Petrochemicals, 2006, 23(5): 6-10.
- [15] 桂张良,安全福,曾俊焄,等.含磺酸甜菜碱两性离子共聚物 P(AM-co-VPPS)的合成及盐溶液性质[J].高分子学报,2009(4):363-368.
GUI Zhangliang, AN Quanfu, ZENG Juntao, et al. Synthesis and salt solution properties of zwitterionic copolymer P(AM-co-VPPS) containing sulfobetaine groups[J]. Acta Polymerica Sinica, 2009(4): 363-368.
- [16] KÖBERLE P, LASCHEWSKY A, TSUKRUK V. The structural order of some novel ionic polymers, 1. X-ray scattering studies[J]. Die Makromolekulare Chemie, 2003, 193(8): 1815-1827.
- [17] LOWE A B, MCCORMICK C L. Synthesis and solution properties of zwitterionic polymers[J]. Chemical Reviews, 2002, 102(11): 4177-4189.
- [18] 韩玉贵.新型两性聚合物絮凝剂的反相乳液法制备及性能研究[J].工业水处理,2006,26(8):26-29.
HAN Yugui. New type of amphoteric copolymer flocculation synthesized by inverse emulsion polymerization and performance tested[J]. Industrial Water Treatment, 2006, 26(8): 26-29.

[编辑 刘文臣]