

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2023044

引用格式: 李昭滢, 杨旭, 杨杰, 等. 压裂液稠化剂两性聚丙烯酰胺的合成与性能评价 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 109-115.

LI Zhaoying, YANG Xu, YANG Jie, et al. Synthesis and property evaluation of a amphoteric polymer fracturing fluid thickener [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 109-115.

压裂液稠化剂两性聚丙烯酰胺的合成与性能评价

李昭滢, 杨旭, 杨杰, 谢恬静, 李江涛, 冯志刚

(西南石油大学化学化工学院, 四川成都 610500)

摘 要: 针对目前国内外水基压裂液所用聚合物稠化剂大多耐盐性能较差的问题, 在丙烯酰胺 (AM) 链上引入阴离子单体 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸 (AMPS) 和阳离子单体甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵 (DMC), 合成了一种两性聚丙烯酰胺 AMPAM。通过分析单体总质量分数、3 种单体质量比、引发剂加量和 pH 值对 AMPAM 相对分子质量和增黏性能的影响, 确定了合成 AMPAM 的最佳条件。评价了 AMPAM 的耐盐性能、溶解性能和增黏性能, 以及以矿化度 30 g/L NaCl 溶液配制的 AMPAM 压裂液的性能, 结果表明: 以高矿化度盐水配制的 0.5%AMPAM 溶液的表观黏度为 20 mPa·s; AMPAM 加量不超过 0.6% 时, 在 20 min 内可以完全溶解; 盐水 AMPAM 压裂液的耐温耐剪切性能、携砂性能和破胶性能均符合水基压裂液通用技术条件。研究结果表明, 两性聚丙烯酰胺 AMPAM 具有良好的耐盐性能, 可以作为盐水聚合物压裂液的稠化剂。

关键词: 聚合物; 压裂液; 稠化剂; 两性聚丙烯酰胺; 耐盐性能

中图分类号: TE357.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)02-0109-07

Synthesis and Property Evaluation of an Amphoteric Polymer Fracturing Fluid Thickener

LI Zhaoying, YANG Xu, YANG Jie, XIE Tianjing, LI Jiangtao, FENG Zhigang

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: At present, most of the polymer thickeners used in water-based fracturing fluid both in China and abroad have poor salt resistance. Therefore, amphoteric polyacrylamide (AMPAM) was synthesized by introducing anionic monomer (2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS)) and cationic monomer (methacryloyloxyethyl trimethyl ammonium chloride (DMC)) into the acrylamide (AM) chain. The effects of the total mass fraction of monomers, mass ratio of monomers, initiator dosage, and pH value on the relative molecular mass and thickening property of AMPAM were studied, and the optimal conditions for AMPAM synthesis were determined. In addition, the salt resistance, solubility, and thickening property of AMPAM, as well as the performance of AMPAM fracturing fluid prepared with NaCl solution with salinity of 30 g/L were evaluated. The results show that the apparent viscosity of AMPAM solution of 0.5% prepared with high-salinity brine was 20 mPa·s, and the AMPAM was completely dissolved within 20 min when its dosage did not exceed 0.6%. The temperature and shear resistance, as well as sand-carrying and gel-breaking properties of AMPAM fracturing fluid prepared with brine meet the general technical requirements of water-based fracturing fluid. The results show that AMPAM has excellent salt resistance and can be used as a thickener for brine polymer fracturing fluid.

Key words: polymer; fracturing fluid; thickener; amphoteric polyacrylamide; salt resistance

随着油气田开发不断深入, 开发环境愈加恶劣, 对压裂液的性能提出了更高的要求^[1]。压裂液种类繁多, 按其物化性质通常可划分为油基压裂液、水基压裂液和泡沫压裂液等^[2]。油基压裂液具有成本

低、可回收和对地层伤害较小的优点, 但存在安全性较差、携砂性能不好、施工难度大和技术水平不高等缺点, 导致其仅用于水敏性储层压裂^[3]。泡沫压裂液是将二氧化碳(氮气)注入清水或聚合物水

收稿日期: 2022-04-25; 改回日期: 2023-03-14。

作者简介: 李昭滢(1998—), 女, 河北沧州人, 2020年毕业于西南石油大学环境工程专业, 在读硕士研究生, 主要从事绿色油田处理剂的研究。E-mail: 506419715@qq.com。

通信作者: 杨旭, yangbrian@163.com。

溶液中并加入稳定剂和表活剂形成的气液两相体系,现场施工难度大、控制精度不足是限制其发展的主要因素^[4]。水基压裂液中的天然植物胶压裂液常采用有机硼交联剂,优点是稳定性强、携砂性能好、施工工艺简单,但抗温性差、破胶液残渣多、摩阻大等缺点使其逐渐丧失优势^[5]。聚合物压裂液目前得到快速发展,其加入有机锆、有机钛、有机硼等交联剂形成的冻胶具有摩阻低、携砂性能好、无残渣、对地层伤害小等优点,但其稳定性、抗温性、抗盐性等与聚合物种类息息相关^[6-9]。聚合物压裂液通常以阴离子型聚丙烯酰胺为稠化剂,阴离子型聚丙烯酰胺具有一定的增黏作用,但耐盐性能较差。阳离子型聚丙烯酰胺虽然大幅度提升了聚丙烯酰胺的耐盐性能,但依然存在水溶性和黏度低等问题;而两性聚丙烯酰胺同时具有较好的耐温耐盐性能和水溶性^[10]。Dai Caili 等人^[11]采用溶液共聚法,以苯乙烯磺酸钠(SSS)、丙烯酰胺(AM)和丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)为单体,制备了新型耐温两性聚丙烯酰胺(PASD);Quan Hongping 等人^[12]通过自由基聚合在水溶液中合成了羧基甜菜碱两性疏水缔合聚丙烯酰胺,表现出良好的耐温性和抗剪切性。目前所合成的两性聚丙烯酰胺在高温下具有优异的增稠能力,但大多耐盐性能较差。为此,笔者在丙烯酰胺(AM)链上引入阴离子单体2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)和阳离子单体甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC),合成了一种两性聚丙烯酰胺 AMPAM。评价结果表明,两性聚丙烯酰胺 AMPAM 具有良好的增黏、溶解、耐盐性能和热稳定性,以两性聚丙烯酰胺 AMPAM 为稠化剂配制的盐水聚合物压裂液具有很好的耐温、耐剪切和破胶性能。

1 合成与评价方法

1.1 试剂与仪器

丙烯酰胺(AM,分析纯)、尿素(分析纯)、无水亚硫酸钠、过硫酸铵(含量 $\geq 98.0\%$,分析纯)和氢氧化钠(含量 $\geq 98.0\%$,分析纯)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS,含量 $\geq 98.0\%$)、甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC)和2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐(V-50,分析纯)。

ESJ120-4B 型电子天平、GKC 数显智能型恒温水浴锅、101-AO 型电热恒温鼓风干燥箱、Quanta450 型环境扫描电子显微镜、W-1 型固体样品粉碎机、乌氏黏度计、WQF-600N 傅里叶红外光谱仪、ZNN-

D6 型六速旋转黏度计和 HAAKE MARS III 型高温高压旋转流变仪。

1.2 AMPAM 的合成

采用水溶液聚合法,将一定量 AM、AMPS 和 DMC 溶于蒸馏水中,滴加 NaOH 溶液,将其 pH 值调整为 6.0,再加入一定量的尿素,充分混合,然后转移到带有搅拌器的四颈烧瓶中,放置于水浴锅中,通入氮气 20 min 后加入过硫酸铵、亚硫酸氢钠及 V-50,搅拌 10 min 后停止通入氮气,将水浴锅温度调为 20 ℃,待溶液完全反应形成胶状物,将胶状物剪成颗粒状放入 80 ℃ 的烘箱中烘 8 h,粉碎制得 AMPAM。

1.3 评价方法

1.3.1 AMPAM 特性黏度及黏均相对分子质量的测定

准确称取 0.05 g AMPAM 放入 100 mL 容量瓶,加入 50 mL 蒸馏水,待充分溶解后加入浓度 2 mol/L 的 NaCl 溶液 50 mL,把容量瓶放于 30 ℃ 水浴锅中搅拌均匀至恒温,用玻璃漏斗过滤。将乌氏黏度计放置于 30 ℃ 恒温水浴中,取 15 mL AMPAM 溶液转入到乌氏黏度计中,测定其特性黏度 $[\eta]$ 。两性聚丙烯酰胺黏均相对分子质量 M 可利用 Mark Houwink 方程计算。

$$[\eta] = KM^\alpha \quad (1)$$

式中: $[\eta]$ 为特性黏度; K 为比例常数; α 为和分子形状有关的经验常数。

K 和 α 与体系的性质有关,在一定相对分子质量范围内与相对分子质量无关。此处 K 取 0.128, α 取 0.586。

1.3.2 热稳定性的测定

热重分析被用来测试待测样品随着温度升高,质量是否发生变化,据此判断待测样品在一定温度下是否稳定。测定 AMPAM 热稳定性时的保护气和吹扫气均采用纯度为 99.999% 的 N_2 ,其流量均为 50 mL/min。测定时温度由 25 ℃ 升至 600 ℃,升温速率控制在 10 ℃/min。

2 合成条件的确定

2.1 单体总质量分数对 AMPAM 性能的影响

设定 AM、AMPS 和 DMC 的质量比为 65:25:10,引发剂加量为单体总质量的 0.2%,反应温度控制在 20 ℃,pH 值调整为 6.0,按单体总质量分数 15%,20%,25%,30% 和 35% 合成 AMPAM,然后测定其黏均相对分子质量和其质量分数 0.5% 溶液的表观黏度,结果如图 1 所示。

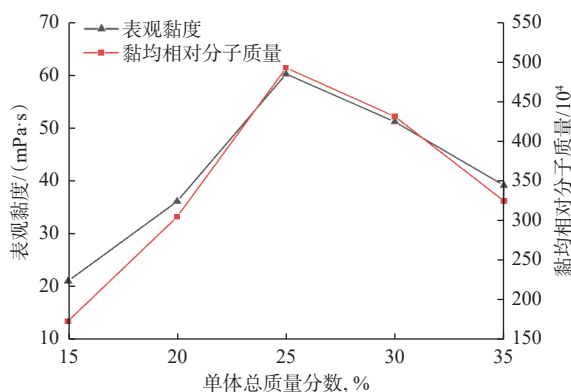


图 1 单体总质量分数对 AMPAM 性能的影响

Fig.1 Effect of total mass fraction of monomers on AMPAM property

由图 1 可知: 随单体总质量分数增加, 所合成 AMPAM 的黏均相对分子质量及其溶液的表观黏度先升高后降低; 单体总质量分数为 25% 时, 所合成 AMPAM 的黏均相对分子质量及其溶液的表观黏度达到最高。这是因为随着单体总质量分数增大, 链增长速率增大, 所合成 AMPAM 的分子链更长, 其黏均相对分子质量和其溶液的表观黏度升高^[13], 但是单体总质量分数超过一定范围后, 反应会快速终止, 所合成 AMPAM 的分子链缩短, 因此其黏均相对分子质量和其溶液的表观黏度均降低。

2.2 单体质量占比对 AMPAM 性能的影响

设定阳离子单体 DMC 的质量占单体总质量的 10% 保持不变, 单体 AM 和 AMPS 的质量之和占单体总质量的 90%, 改变单体 AMPS 质量占总单体总质量的占比合成 AMPAM, 测试合成 AMPAM 的黏均相对分子质量及其质量分数 0.5% 溶液的表观黏度, 结果如图 2 所示。

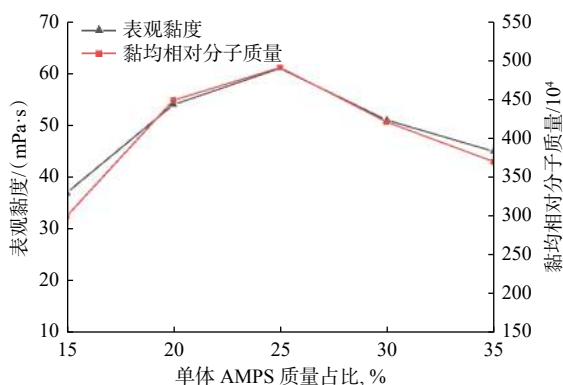


图 2 单体 AMPS 质量占比对 AMPAM 性能的影响

Fig.2 Effect of mass ratio of AMPS on AMPAM property

由图 2 可知, 随着单体 AMPS 质量占比增大, 所

合成 AMPAM 的黏均相对分子质量及其溶液的表观黏度均先升高后降低。这是因为随着 AMPS 质量占比增大, AMPAM 中的负电荷增多, 不同链之间的阴阳离子相互吸引形成较弱的物理交联, AMPAM 中的阳离子基团会和带负电荷的磺酸基作用, 使分子链卷曲, 流体力学半径较小, 使其溶液的表观黏度降低。但是当 AMPS 质量占比过大时, 聚合反应更剧烈, 容易因放热形成局部高温产生大量自由基, 使分子链终止速度加快, 从而易形成黏均相对分子质量较低的寡聚体^[14], 使其溶液黏度降低。因此, 确定单体 AMPS 的质量占单体总质量的 25%。

2.3 引发剂加量对 AMPAM 性能的影响

设定 AM、AMPS 和 DMC 的质量比为 65:25:10, 加入不同量的引发剂, 在温度 20 ℃、pH 值为 6.0 的条件下合成 AMPAM, 测试所合成 AMPAM 的黏均相对分子质量及其质量分数 0.5% 溶液的表观黏度, 结果如图 3 所示。

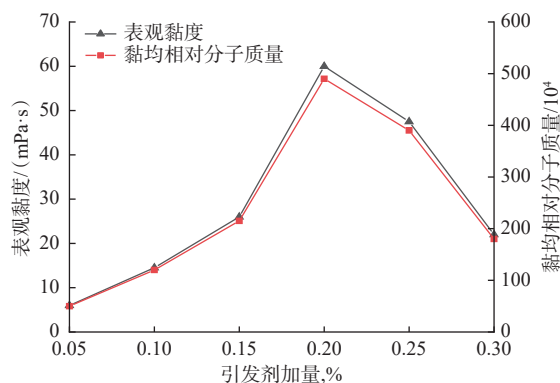


图 3 引发剂加量对 AMPAM 性能的影响

Fig.3 Effect of initiator dosage on AMPAM property

从图 3 可以看出, 随着引发剂加量增大, AMPAM 的黏均相对分子质量及其溶液的表观黏度均先升高后降低。引发剂加量较小时, 活性自由基数量较少, 无法在短时间内反应生成高相对分子质量的 AMPAM^[15], 然而当引发剂加量继续增大, 反应活性过高, 容易形成寡聚体, 导致 AMPAM 的相对分子质量降低^[16]。因此, 引发剂加量选择 0.2%。

2.4 pH 值对 AMPAM 性能的影响

合成 AMPAM 采用的引发体系是由亚硫酸氢钠和 V-50 组成的复合引发体系, 而亚硫酸氢钠对 pH 值的依赖性强^[17]。因此, 需要优选合适的 pH 值。固定引发温度、引发剂加量、单体质量比、单体总质量分数等, 改变 pH 值合成 AMPAM, 测试 AMPAM 的黏均相对分子质量及其质量分数 0.5% 溶液的表观黏度, 结果如图 4 所示。

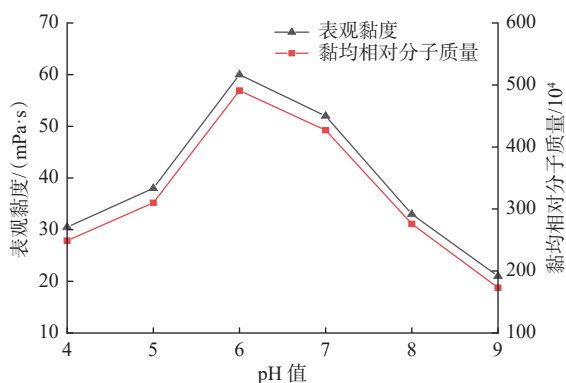


图4 pH值对AMPAM性能的影响

Fig.4 Effect of pH value on AMPAM property

从图4可以看出,随着pH值增大,AMPAM的黏均相对分子质量及其溶液表观黏度均先升高后降低。这是由于酸度较高时,溶液中的 H^+ 会促进氧化还原反应的发生,使反应中心数目增多,聚合程度降低,导致产物的相对分子质量降低^[18]。pH值过高时,反应体系中产生氮氟丙酰胺(NTP)链转移剂,使产物的相对分子质量降低,导致溶液的黏度降低。根据试验结果,确定反应体系的pH值为6.0。

3 AMPAM的结构表征

采用KBr压片法,利用红外光谱仪测试AMPAM的红外光谱,结果如图5所示。

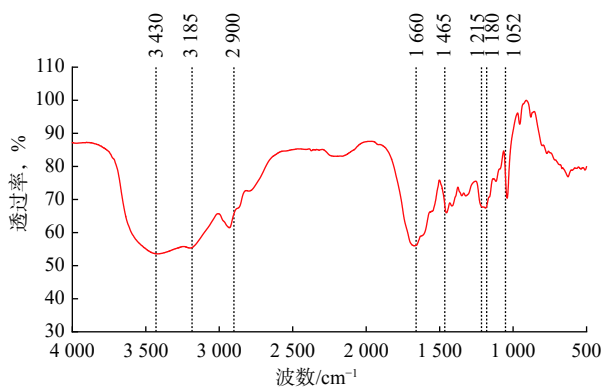


图5 AMPAM的红外谱图

Fig.5 Infrared spectrum of AMPAM

由图5可知:3 645~3 125 cm^{-1} 的宽峰源于不同基团的相互作用,该区间内包含 $-NH_2$ 基和 $-OH$ 基的吸收峰;1 660 cm^{-1} 处的吸收峰为伯酰胺 $-C=O$ 的伸缩振动峰;2 922和1 400 cm^{-1} 处的吸收峰为 $-CH_2-$ 和 $-CH_3$ 的振动吸收峰;1 052 cm^{-1} 处的吸收峰是DMC所含 $-C-O-C-$ 基的伸缩振动峰。此外,1 188.1和1 041.6 cm^{-1} 处的吸收峰为

$-SO_3-$ 基团的特征吸收峰。可以看出,AM、AMPS和DMC的特征峰都已出现在图中。

4 AMPAM的性能评价

4.1 增黏性能

配制质量分数0.2%~0.7%的AMPAM溶液,在常温下使用六速旋转黏度计以170 s^{-1} 的剪切速率测试其表观黏度,结果如图6所示。

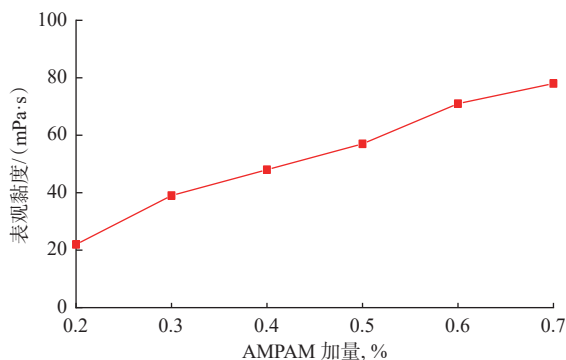


图6 AMPAM溶液表观黏度与其加量的关系

Fig.6 Relationship between apparent viscosity and dosage of AMPAM solution

由图6可知,随AMPAM加量增大,其溶液的表观黏度升高。这是因为AMPAM上的正电荷和负电荷表现出静电吸引作用,通过静电作用形成了许多链节,并且随着其加量增大,相互吸引的正负电荷增多,网状结构变得更强(见图7);且AMPAM溶解过程中也会产生氢键,在氢键作用下会形成许多分子间链节,进一步催生了网状结构。两性聚丙烯酰胺与单一性质的聚丙烯酰胺增黏的不同之处是单一性质的聚丙烯酰胺主要是通过增大其流体力学体积来增黏,而两性聚丙烯酰胺增黏主要依靠阴阳离子电荷之间的相互作用力形成网状结构来增黏。

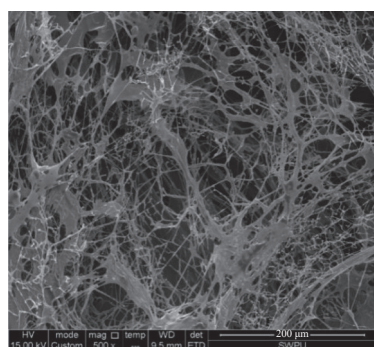
4.2 溶解性能

取一定量的蒸馏水,加入不同量的AMPAM,在温度30 $^{\circ}C$ 下以400 r/min的转速搅拌,每搅拌10 min测试1次表观黏度,结果如图8所示。

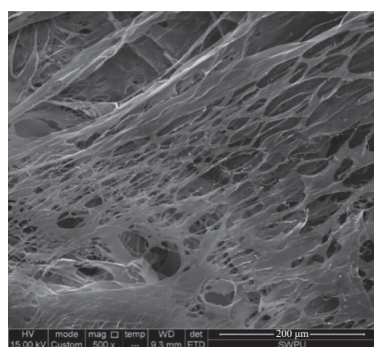
由图8可知,AMPAM加量小于0.6%时,20 min内能够完全溶解;随着AMPAM加量增大,AMPAM的溶解速率逐渐变慢;当其加量大于0.6%时,无法在40 min内完全溶解。

4.3 耐盐性能

配制矿化度为0~20 g/L的氯化钠溶液和矿化度为0~10 g/L的氯化钙溶液,在不同矿化度的氯化



(a) 0.1%AMPAM 溶液



(b) 0.5%AMPAM 溶液

图 7 不同 AMPAM 溶液的扫描电镜图

Fig.7 SEM photographs of AMPAM solution with different dosage

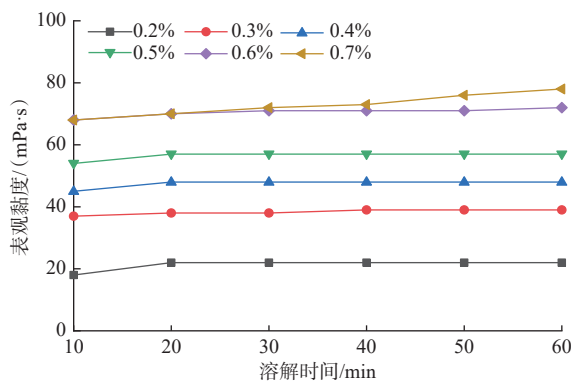


图 8 AMPAM 加量与表观黏度和溶解时间的关系

Fig.8 Relationship between AMPAM dosage and apparent viscosity and dissolution time

钠溶液和氯化钙溶液中分别加入 0.5% 的 AMPAM、常用阳离子和阴离子聚丙烯酰胺, 搅拌均匀, 然后在温度 30 °C 下用六速旋转黏度计测试其表观黏度, 结果如图 9 和图 10 所示。

从图 9 和图 10 可以看出, 用矿化度为 20 g/L 的氯化钠溶液和矿化度为 10 g/L 的氯化钙溶液配制质量分数 0.5%AMPAM 的溶液, 其黏度依然在 20 mPa·s, 表明 AMPAM 有非常好的耐盐性能, 耐盐性能优于常用的阳离子和阴离子聚丙烯酰胺。

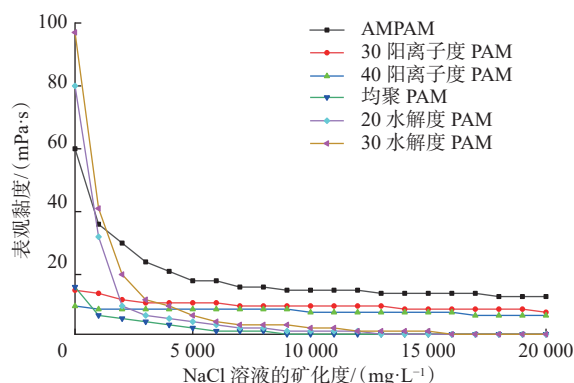


图 9 不同聚合物的耐 NaCl 的能力

Fig.9 NaCl resistance of different polymers

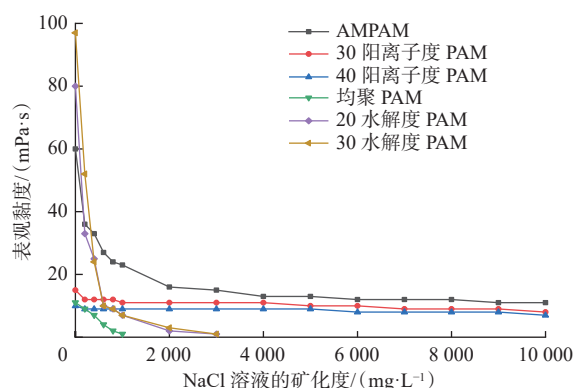


图 10 不同聚合物的耐 CaCl₂ 的能力

Fig.10 CaCl₂ resistance of different polymers

4.4 热稳定性

通过测定一定质量 AMPAM 加热到不同温度下的质量, 考察 AMPAM 的热稳定性。温度从 25 °C 升至 600 °C, 升温速率为 10 °C/min, 测试结果如图 11 所示。

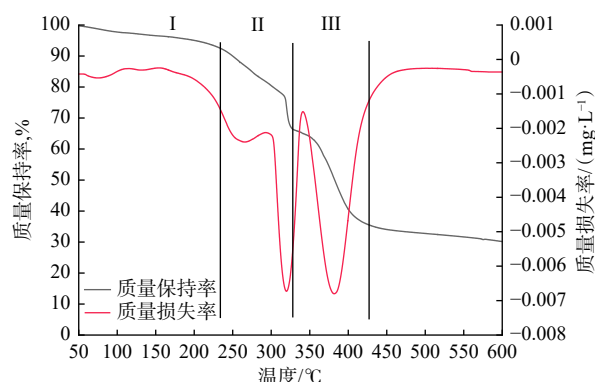


图 11 AMPAM 的热重曲线

Fig.11 Thermogravimetric curve of AMPAM

图 11 中 AMPAM 的热重曲线可分为 3 个阶段: 第 1 阶段是 25~235 °C, 在 100 °C 以下损失的质量

是 AMPAM 中的水分,这是由于 AMPAM 分子中的磺酸基和酰胺基有良好的吸水性和强亲水性^[19],在 100~235 ℃ 损失的质量是未反应的单体和残留的溶剂;第 2 阶段是 235~327 ℃,该阶段 AMPAM 开始分解,分子链中的酰胺基和磺酸基发生消除反应;第 3 阶段是 327~425 ℃,该阶段 AMPAM 的主链和支链开始发生断裂和分解。因此,AMPAM 具有较好的热稳定性。

5 AMPAM 压裂液性能评价

5.1 耐温耐剪切性能

耐温耐剪切性能是压裂液最重要的性能指标,直接影响压裂液施工造缝和携砂的能力^[20-21]。在矿化度为 30 g/L 的氯化钠溶液中加入 0.5% 的 AMPAM,待其完全溶解后再加入 0.5% 的交联剂 XCS-1,待其交联形成冻胶后,利用 HAAKE MARS III 型高温高压旋转流变仪,在温度 145 ℃ 下以 170 s⁻¹ 的剪切速率测试其表观黏度随剪切时间的变化,结果如图 12 所示。

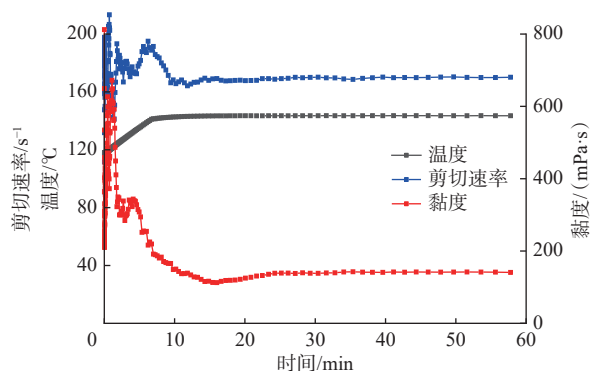


图 12 AMPAM 压裂液在 145 ℃ 下的剪切曲线

Fig.12 Shear curve of AMPAM fracturing fluid at 145 °C

由图 12 可知,以矿化度 30 g/L 氯化钠溶液配制的 AMPAM 压裂液在温度 145 ℃ 下以 170 s⁻¹ 的剪切速率剪切 1 h 后,表观黏度仍能达到 140 mPa·s,远高于行业标准《压裂液通用技术条件》(SY/T 6376—2008)的最低要求(大于 40 mPa·s),表明 AMPAM 压裂液有良好的耐温耐剪切性能。

5.2 携砂性能

在矿化度为 30 g/L 的氯化钠溶液中加入 0.5% AMPAM 配制的 AMPAM 压裂液基液,分别加入 10%, 20% 和 30% 的陶粒,再加入 0.5% 的交联剂 XCS-1,观察其携砂性能,发现 4 h 内陶粒几乎没有

沉降,表明 AMPAM 压裂液具有良好的携砂性能。

5.3 破胶性能

破胶剂过硫酸铵加量固定为 0.1%,考察不同温度下 AMPAM 压裂液的破胶情况,结果见表 1。

表 1 AMPAM 压裂液的破胶性能

Table 1 Gel breaking property of AMPAM fracturing fluid

温度/℃	破胶时间/h	破胶黏度/(mPa·s)	残渣含量/(mg·L ⁻¹)
60	8.0	3.17	177.3
90	4.0	2.39	109.1
120	2.5	2.16	92.3
150	1.0	2.23	80.9

从表 1 可以看出:在温度 60 ℃ 下,AMPAM 压裂液可以在 8 h 内破胶;在温度 90 ℃ 以上,AMPAM 压裂液可以在 4 h 内破胶;AMPAM 压裂液破胶液的黏度低于 4 mPa·s、残渣含量均低于 180 mg/L,其破胶性能满足行业标准《压裂液通用技术条件》(SY/T 6376—2008)的要求^[22]。总体而言,AMPAM 压裂液在不同温度下的破胶效果较好,能满足一定条件下的压裂施工要求。

6 结 论

1)以丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)和丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)为单体,合成了一种两性聚丙烯酰胺 AMPAM。最佳合成条件:单体 AM、AMPS 和 DMC 的质量比为 65:25:10;3 种单体的总质量分数为 25%;复合引发剂 2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐加量为单体总质量的 0.2%;合成体系 pH 值为 6.0,合成温度 20 ℃。

2)两性聚丙烯酰胺 AMPAM 同时具有很好的溶解性和耐盐性能,其加量小于 0.6% 时,20 min 内能够完全溶解;以矿化度为 20 g/L 的氯化钠溶液和 10 g/L 的氯化钙溶液配制的 0.5%AMPAM 溶液的黏度为 20 mPa·s。

3)以矿化度为 30 g/L 的氯化钠溶液配制 AMPAM 压裂液的耐温耐剪切性能、携砂性能和破胶性能均能满足行业标准《压裂液通用技术条件》(SY/T 6376—2008)的要求,这表明两性聚丙烯酰胺 AMPAM 具有很好的耐盐性能,适合作为盐水聚合物压裂液的稠化剂。

参 考 文 献

References

- [1] 何春明, 陈红军, 刘超, 等. 高温合成聚合物压裂液体系研究 [J]. *油田化学*, 2012, 29(1): 65–68.
HE Chunming, CHEN Hongjun, LIU Chao, et al. Study of high temperature synthetic polymer fracturing fluid[J]. *Oilfield Chemistry*, 2012, 29(1): 65–68.
- [2] 陈大钧, 陈馥. 油气田应用化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
CHEN Dajun, CHEN Fu. Applied chemistry of oil and gas fields [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [3] 程代淑, 董丽, 刘占国. HYY-98 型油基冻胶压裂液及其应用 [J]. *石油钻采工艺*, 2000, 22(4): 81–82.
CHENG Daishu, DONG Li, LIU Zhanguo. HYY-98 oil-based gel fracturing fluid and its application[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2000, 22(4): 81–82.
- [4] 李小刚, 宋峙潮, 宋瑞, 等. 泡沫压裂液研究进展与展望 [J]. *应用化工*, 2019, 48(2): 412–417.
LI Xiaogang, SONG Zhichao, SONG Rui, et al. Research progresses and expectation on foam fracture fluid[J]. *Applied Chemistry*, 2019, 48(2): 412–417.
- [5] 杜涛, 姚奕明, 蒋廷学, 等. 合成聚合物压裂液最新研究及应用进展 [J]. *精细石油化工进展*, 2016, 17(1): 1–5.
DU Tao, YAO Yiming, JIANG Tingxue, et al. Recent progress of research on synthetic polymer fracturing fluids and their application[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2016, 17(1): 1–5.
- [6] 于洋, 郭粉娟, 李立, 等. 自缔合压裂液优选及应用 [J]. *断块油田*, 2021, 28(4): 566–570.
YU Yang, GUO Fenjuan, LI Li, et al. TOptimization and application of self-association fracturing fluid[J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(4): 566–570.
- [7] 张伟, 任登峰, 周进, 等. 耐高温耐盐低伤害压裂液聚合物稠化剂的研制及应用 [J]. *特种油气藏*, 2022, 29(6): 159–167.
ZHANG Wei, REN Dengfeng, ZHOU Jin, et al. Development and application of polymer thickener for fracturing fluid with high temperature and salt resistance and low damage[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(6): 159–167.
- [8] 王超, 崔明月, 张旭, 等. 缓速交联超高温合成聚合物压裂液稠化剂研究 [J]. *钻井液与完井液*, 2022, 39(3): 390–396.
WANG Chao, CUI Mingyue, ZHANG Xu, et al. Study on fracturing fluid formulated with ultra-high temperature retarded crosslinking polymers[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(3): 390–396.
- [9] 吕振虎, 郭国栋, 郑苗, 等. 基于溶胀-熟化机理的疏水缔合聚合物速溶压裂液技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(4): 104–109.
LYU Zhenhu, WU Guodong, ZHENG Miao, et al. An instantly dissolving fracturing fluid technology using hydrophobic associating polymers based on swelling-curing mechanisms[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(4): 104–109.
- [10] 周成裕, 陈馥, 黄磊光. 一种疏水缔合聚合物压裂液稠化剂的室内研究 [J]. *石油与天然气化工*, 2008, 37(1): 62–64.
ZHOU Chengyu, CHEN Fu, HUANG Leiguang. A laboratory study on one kind of hydrophobic association fracturing fluid gelatinizer[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2008, 37(1): 62–64.
- [11] DAI Caili, XU Zhongliang, WU Yining, et al. Design and study of a novel thermal-resistant and shear-stable amphoteric polyacrylamide in high-salinity solution[J]. *Polymers*, 2017, 9(7): 296.
- [12] QUAN Hongping, TIAN Haiyang, HUANG Zhiyu, et al. Salt stimulus response of a carboxyl betaine amphoteric hydrophobic associative polyacrylamide[J]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2017, 90(7): 1193–1201.
- [13] 李志臻. 电吸引缔合聚合物压裂液稠化剂的合成及配方研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
LI Zhizhen. Study on the synthesis and formulation of the thickener for the electroattractive associating polymer fracturing fluid [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [14] 马喜平, 代磊阳, 马启睿. 一种具有优良抑制性能降滤失剂的合成与评价 [J]. *精细化工*, 2014, 31(5): 633–637.
MA Xiping, DAI Leiyang, Ma Qirui. Synthesis and evaluation of a fluid loss additive with significant inhibition effect[J]. *Fine Chemicals*, 2014, 31(5): 633–637.
- [15] 童甲甲. 不同离子型 PAM 的合成与应用研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
TONG Jiajia. Study on the synthesis and application of different type of polyacrylamide[D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2017.
- [16] 肖光. 两性聚丙烯酰胺的合成及其增强性能的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
XIAO Guang. Study on synthesis and strength of amphoteric polyacrylamide[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019.
- [17] 董国峰. 一种用于二氧化碳泡沫压裂液的稠化剂研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
DONG Guofeng. Study on a thickener for carbon dioxide foam fracturing fluid [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [18] 王传兴. 两性聚丙烯酰胺分散体系的合成及溶胀特性 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2010.
WANG Chuanxing. Preparation and swelling properties of amphoteric polyacrylamide dispersion[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2010.
- [19] 吴伟, 刘平平, 孙昊. AAMS-1 疏水缔合聚合物压裂液稠化剂合成与应用 [J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(5): 114–118.
WU Wei, LIU Pingping, SUN Hao. Synthesis and application of a hydrophobically associating polymer viscosifier for fracturing fluids[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(5): 114–118.
- [20] 蓝程程, 方波, 卢拥军, 等. 三异丙醇胺改性黄原胶溶液流变特性 [J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(3): 371–377.
LAN Chengcheng, FANG Bo, LU Yongjun, et al. Rheology of triisopropanolamine modified xanthan water solution[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(3): 371–377.
- [21] ZHANG Yang, MAO Jincheng, ZHAO Jinzhou, et al. Preparation of a novel fracturing fluid system with excellent elasticity and low friction[J]. *Polymers*, 2019, 11(10): 1539–1560.
- [22] SY/T 6376—2008 压裂液通用技术条件 [S].
SY/T 6376—2008 General technical specifications of fracturing fluids[S].