

不同疏水单体对 PAM 的协同增效作用研究

冯新根¹, 王磊^{1*}, 赵文², 苗林³, 赖小娟¹, 杨旭¹

(1. 陕西科技大学化学与化工学院, 轻化工助剂化学与技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710021; 2. 中国石油长庆油田分公司油田开发事业部, 陕西 西安 710021; 3. 西安长庆化工集团有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要:以丙烯酰胺(AM)、丙烯酸(AA)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)、十八烷基二甲基烯丙基氯化铵(ODAAC)和十八烷基甲基丙烯酸酯(SMA)为单体,通过水溶液聚合分别制备 4 种聚丙烯酰胺(PAM),通过红外对其结构、抗盐性能、热稳定性和流变性能进行表征及测试。结果表明,单体都参与了聚合反应。0.35%的五元 PAM(AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA)在 80 000 $\mu\text{g/g}$ 矿化水和 10% 氯化钙溶液中的黏度分别达到 78 mPa·s 和 60 mPa·s,证明 ODAAC 对 PAM 的抗盐起主要作用,与 SMA 在抗盐方面具有协同增效作用;同时 ODAAC 和 SMA 对 PAM 的热稳定性和耐温耐剪切性能都具有协同增效作用。

关键词: PAM; 溶解; 抗盐; 流变; 协同增效

中图分类号: TQ630

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)02-0214-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.02.041

Synergistic effect of different hydrophobic monomers on polyacrylamide

FENG Xin-gen¹, WANG Lei^{1*}, ZHAO Wen², MIAO Lin³, LAI Xiao-juan¹, YANG Xu¹

(1. Key Laboratory of Auxiliary Chemistry & Technology for Light Chemical Industry of the Ministry of Education, College of Light Industry and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Gas Field Development Division, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China; 3. Xi'an Changqing Chemical Group Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: Four kinds of polyacrylamide are respectively prepared through aqueous solution polymerization with acrylamide (AM), acrylic acid (AA), 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS), octadecyl dimethyl allylammonium chloride (ODAAC) and stearyl methacrylate (SMA) as monomers. Samples' structures, salt resistance, thermal stability and rheological properties are characterized and tested by IR. Results show that all monomers have participated in the polymerization. The viscosities of 0.35% polyacrylamide (AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA) in 80 000 $\mu\text{g/g}$ mineralized water and 10% CaCl_2 solution reaches 78 mPas and 60 mPas, respectively, proving that ODAAC plays a major role in the salt resistance of the polyacrylamide, and has synergistic effect with SMA in salt resistance. In addition, both ODAAC and SMA have synergistic effects on the thermal stability, temperature resistance and shear resistance of polyacrylamide.

Key words: polyacrylamide; dissolution; salt resistance; rheology; synergism

在油气田不断开发过程中,人工合成的聚丙烯酰胺(PAM)在油田上的使用量日益增大^[1-4]。常规的 PAM 随着地层水矿化度的增加,溶液的黏度会迅速下降,不适用于高矿化度的地层条件,既抗盐能力差。在亲水性分子链中引入疏水基团合成疏水缔合 PAM,其侧链上的疏水长链会在溶液中发生聚集,当聚合物达到一定浓度时,会产生疏水缔合作用,这种作用能够提高 PAM 的抗盐性能^[5-6]。但是对于高矿化度的地层环境,加入单一疏水单体的疏水缔合 PAM 的抗盐能力明显不足^[7-10]。如何提高疏水缔合 PAM 在高矿化度地层水中的黏度是关键,相对

于单一疏水单体 PAM,对加入 2 种或 2 种以上的疏水缔和 PAM 抗盐能力的研究相对较少。

基于以上问题,笔者以丙烯酰胺(AM)、丙烯酸(AA)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)为主要单体,以 ODAAC 和 SMA 为疏水单体,采用水溶液聚合制备出疏水缔和 PAMAM+AA+AMPS+ODAAC+SMA,并利用红外光谱对其分子结构进行测试,通过与 AM+AA+AMPS、AM+AA+AMPS+ODAAC、AM+AA+AMPS+SMA 三种 PAM 的抗盐性能的对比测试,研究 2 种疏水单体对 PAM 的抗盐性能的影响,并对 4 种 PAM 的热稳定性和流变性能进

收稿日期:2020-09-24;修回日期:2020-12-14

作者简介:冯新根(1995-),男,硕士研究生,主要从事油田化学品方面的研究,1370752349@qq.com;王磊(1981-),男,博士,教授,主要从事油田化学品和环境友好高分子材料的研究,通讯联系人,346341247@qq.com。

行了对比研究。

1 实验部分

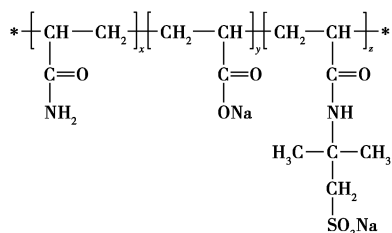
1.1 试剂和仪器

试剂:丙烯酰胺(AM)、丙烯酸(AA)、2-丙烯酰胺基-2-甲基磺酸(AMPS),均为工业品;十八烷基二甲基烯丙基氯化铵(ODAAC)、十八烷基甲基丙烯酸酯(SMA),陕西长海油田助剂有限公司生产;氯化钠(NaCl),AR,天津市天力化学试剂有限公司生产;氯化钾(KCl),天津市河东区红岩试剂厂生产;氯化钙(CaCl₂),AR,国药集团化学试剂有限公司生产;氯化镁(MgCl₂),AR,天津市科密欧化学试剂有限公司生产;实验用水为自制去离子水。

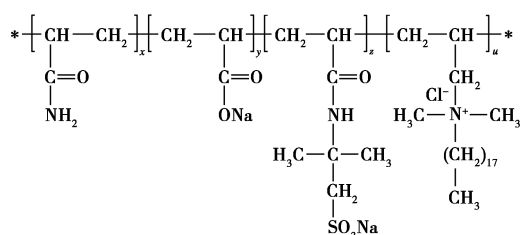
仪器:ZNN-D6 II型电动六速黏度计,青岛宏煜琳石油仪器有限公司生产;傅里叶红外光谱仪,VECTOR-22,德国Bruker公司生产;HAAKE MARS IV流变仪,德国哈克公司生产。

1.2 PAM的制备过程

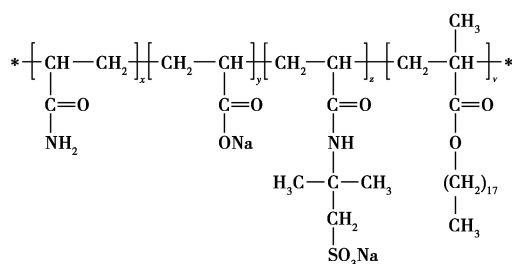
分别制备AM+AA+AMPS、AM+AA+AMPS+ODAAC、AM+AA+AMPS+SMA和AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA 4种PAM,其结构式如图1所示,制备方法如下:称取一定质量的AM、AA、AMPS、ODAAC、SMA,加入适量的蒸馏水进行溶解,用20%的氢氧化钠溶液调节单体溶液的pH至7.50,中和完成之后将单体溶液在冰浴中进行降温,当温度降至5℃时将单体溶液加入到保温瓶中,通氮气30 min后,依次加入引发剂进行引发,待单体溶液变黏时停止通氮气,当温度升至最高温度后,保温4 h后可得白色PAM胶块,对胶块进行剪碎、烘干、研磨即可得PAM粉末。



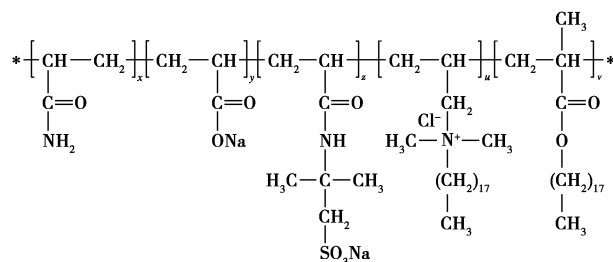
(a) AM+AA+AMPS合成的PAM分子结构式



(b) AM+AA+AMPS+ODAAC合成的PAM分子结构式



(c) AM+AA+AMPS+SMA合成的PAM分子结构式



(d) AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA合成的PAM分子结构式

图1 4种PAM分子结构式

1.3 PAM结构表征测试

1.3.1 红外光谱测试

采用溴化钾粉末压片制样,利用傅里变换红外光谱仪对共聚物的结构进行表征。

1.3.2 PAM分子质量的测试

采用一点法,利用乌氏黏度计对4种PAM的黏均分子质量进行测试,测试方法参考《GB/T 12005.1—1989》聚丙烯酰胺特性黏数测定方法。

1.3.3 PAM溶液黏度测试

配制0.1%~0.6%的PAM溶液,测试其溶液黏度,研究其黏度变化特征。

1.3.4 抗盐性能测试

标准80 000 μg/g的矿化水的配制方法:将58.5 g氯化钠+20 g氯化钾+4.5 g氯化镁+5.5 g氯化钙定容至1 L。分别稀释得到5 000、10 000、40 000、80 000 μg/g的矿化水,并配制质量分数为10%的氯化钙水溶液,5种不同的矿化水中分别加入0.35%的PAM粉末,置于30℃水浴中进行溶解,在不同时间段对溶液的表现黏度进行测试。

1.3.5 热稳定性测试

利用热重分析仪对4种PAM粉末进行热稳定性测试,设定温度范围为20~600℃,升温速率为20℃/min, N₂流速为40 mL/min。

1.3.6 流变性能测试

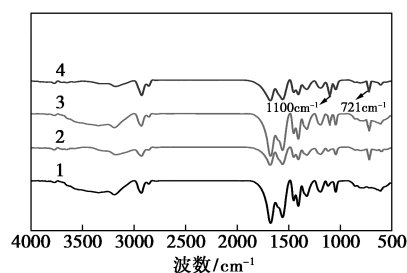
利用HAAKE MARS IV流变仪对4种PAM 0.35%的清水溶液在90℃条件下进行耐剪切测试,剪切速率为170 s⁻¹,升温速率为3℃/min,研

究 PAM 溶液的耐温耐剪切性能;在 30℃ 条件下进行变剪切测试,先在 170 s⁻¹ 的条件下剪切 1 800 s,然后在 510 s⁻¹ 的剪切速率下剪切 900 s,最后在 170 s⁻¹ 剪切速率下再剪切 1 800 s,研究溶液的黏度变化。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱测试

4 种不同 PAM 的红外光谱如图 2 所示。



1—AM+AA+AMPS;2—AM+AA+AMPS+ODAAC;
3—AM+AA+AMPS+SMA;4—AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA

图 2 4 种不同 PAM 的红外光谱

由图 2 可知,3 180 cm⁻¹ 附近为酰胺基的 N—H 键的伸缩振动吸收峰,2 930 cm⁻¹ 为饱和 C—H 键的伸缩振动峰,1 670 cm⁻¹ 附近为酰胺基 C=O 的伸缩振动吸收峰,1 450 cm⁻¹ 附近为酰胺基的特征伸缩振动峰,1 190 cm⁻¹ 附近为 AMPS 中 S=O 键对称伸缩振动吸收峰,1 100 cm⁻¹ 为 C—O—C 键的伸缩振动吸收峰,721 cm⁻¹ 为—(CH₂)_n—的弯曲振动吸收峰,606 cm⁻¹ 附近为 C—S 键的伸缩振动吸收峰。在谱图中,在 1 600 cm⁻¹ 处无吸收峰,说明不存在 C=C 双键,分子聚合符合结构设计。由于 4 种 PAM 分子结构中的基团基本相似,所以 4 种 PAM 的红外谱图出峰的位置基本相同,与 AM+AA+AMPS 三元 PAM 相比,AM+AA+AMPS+ODAAC、AM+AA+AMPS+SMA 和 AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA 三种 PAM 分子链中都含有—(CH₂)_n—疏水长链,因此这 3 种 PAM 在 721 cm⁻¹ 处都有较强的出峰,由四元共聚物 AM+AA+AMPS+ODAAC 的红外光谱可知,其出峰强度相较于三元 PAMAM+AA+AMPS 特征峰强度整体变弱,通过五元共聚物 AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA 的红外光谱可知,其出峰强度同样弱于三元 PAMAM+AA+AMPS,说明长链阳离子疏水单体 ODAAC 对于其他基团的吸收峰的强度有一定削弱作用,同时也说明 ODAAC 和 SMA 这 2 种疏水单体都参与了聚合反应。

2.2 4 种 PAM 黏均分子质量测试

为了减少 PAM 的溶解和黏度测试过程中 PAM 分子质量对其测试结果的影响,在引发温度为 5℃、单体质量分数为 30%、单体溶液的 pH 为 7.50、单体和引发剂的用量相同的条件下聚合出 4 种不同的 PAM,方法参照《GB/T 12005.1—1989》中所述的方法对其黏均分子质量进行测试,结果如表 1 所示。

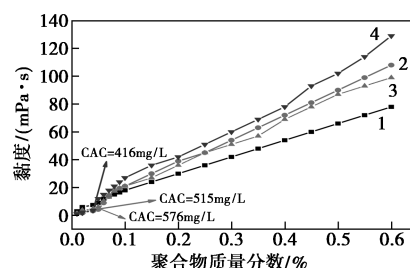
表 1 4 种 PAM 的黏均分子质量测试结果

PAM 类别	特性黏数[η]/ (dL·g ⁻¹)	黏均分子 质量
AM+AA+AMPS	10.83	5.87×10 ⁶
AM+AA+AMPS+ODAAC	10.78	5.76×10 ⁶
AM+AA+AMPS+SMA	11.02	6.04×10 ⁶
AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA	10.96	5.92×10 ⁶

由表 1 可知,在相同引发温度、单体质量分数、pH、单体和引发剂用量的情况下聚合出的 4 种 PAM 的黏均分子质量差距不大,因为在反应条件相同的情况下,聚合反应的速率基本一致,所以 4 种 PAM 的黏均分子质量能够在 6.0×10⁶ 左右。

2.3 不同 PAM 的溶解性能测试

不同质量分数聚合物的黏度如图 3 所示。



1—AM+AA+AMPS;2—AM+AA+AMPS+ODAAC;
3—AM+AA+AMPS+SMA;4—AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA

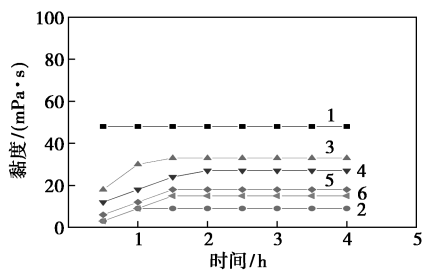
图 3 不同质量分数聚合物的黏度测试结果

由图 3 可知,随着聚合物质量分数的增加,4 种聚合物溶液的黏度呈上升趋势,对于三元聚合物 AM+AA+AMPS,其黏度基本和聚合物质量分数呈正比增长趋势。由于聚合物中不存在疏水单体,没有 CAC,所以聚合物溶液的黏度没有出现突变点。对于四元聚合物 AM+AA+AMPS+ODAAC,由于分子链中含有长链疏水单体 ODAAC,所以聚合物溶液存在 CAC,其 $\rho(\text{CAC}) = 515 \text{ mg/L}$;对于四元聚合物 AM+AA+AMPS+SMA,其分子链中含有长链非离子单体 SMA,所以其聚合物溶液中也存在 CAC,其 $\rho(\text{CAC}) = 576 \text{ mg/L}$;对于五元聚合物 AM+AA+

AMPS+ODAAC+SMA,其分子链中同时含有阳离子单体 ODAAC 和非离子单体 SMA,所以其聚合物溶液的 CAC 相较于四元聚合物 AM+AA+AMPS+ODAAC 和 AM+AA+AMPS+SMA 更低,其 $\rho(\text{CAC})=416 \text{ mg/L}$ 。当聚合物质量分数较低时,分子链的疏水基团以分子内缔和为主,分子链在水溶液中以卷曲结构分布在水溶液中,当聚合物质量浓度大于 $\rho(\text{CAC})$ 时,分子链的疏水基团以分子间缔和为主,聚合物分子链之间相互缠绕,使聚合物溶液形成空间三维网络结构,溶液体系的表现黏度迅速增大,对于五元共聚物 AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA,在聚合物质量分数为 0.35% 时,聚合物溶液的黏度达到 $69 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,当聚合物质量分数为 0.60% 时,聚合物溶液的黏度达到 $129 \text{ mPa}\cdot\text{s}$;这是因为聚合物分子主链由亲水单体 AM 和 AA、AMPS 以及少量的疏水单体组成,在水溶液中具有有良好的溶解性。

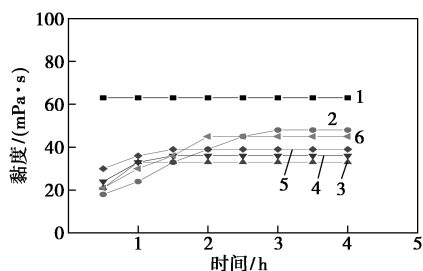
2.4 抗盐性能测试

保持相同的单体质分数、引发温度、pH 合成出 AM+AA+AMPS、AM+AA+AMPS+ODAAC、AM+AA+AMPS+SMA 和 AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA 4 种 PAM,以 0.35% 的质量分数在不同矿化度盐水中进行溶解并进行黏度测试,结果如图 4~图 7 所示。



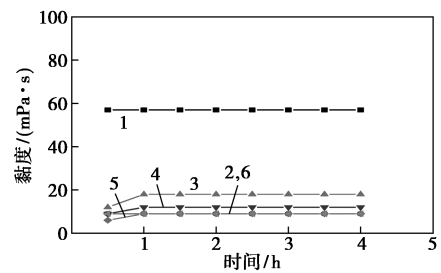
1—清水;2—10%氯化钙水溶液;3—5 000 $\mu\text{g/g}$;
4—10 000 $\mu\text{g/g}$;5—40 000 $\mu\text{g/g}$;6—80 000 $\mu\text{g/g}$

图 4 AM+AA+AMPS PAM 不同矿化度下 0.35% 溶液的黏度变化情况



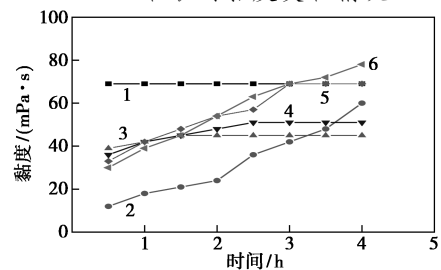
1—清水;2—10%氯化钙水溶液;3—5 000 $\mu\text{g/g}$;
4—10 000 $\mu\text{g/g}$;5—40 000 $\mu\text{g/g}$;6—80 000 $\mu\text{g/g}$

图 5 AM+AA+AMPS+ODAAC PAM 不同矿化度下 0.35% 溶液的黏度变化情况



1—清水;2—10%氯化钙水溶液;3—5 000 $\mu\text{g/g}$;
4—10 000 $\mu\text{g/g}$;5—40 000 $\mu\text{g/g}$;6—80 000 $\mu\text{g/g}$

图 6 AM+AA+AMPS+SMA PAM 不同矿化度下 0.35% 溶液的黏度变化情况



1—清水;2—10%氯化钙水溶液;3—5 000 $\mu\text{g/g}$;
4—10 000 $\mu\text{g/g}$;5—40 000 $\mu\text{g/g}$;6—80 000 $\mu\text{g/g}$

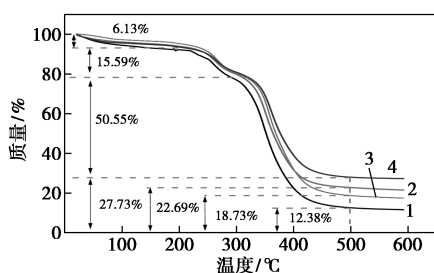
图 7 AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA PAM 不同矿化度下 0.35% 溶液的黏度变化情况

由图 4~图 7 可知,加入疏水单体的 PAM 的增稠性能明显提高,加入 ODAAC 的 0.35% PAM 清水溶液的黏度从 $48 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 提高到 $63 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,加入 SMA 的 0.35% PAM 清水溶液的黏度从 $48 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 提高到 $57 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,而同时加入 ODAAC 和 SMA 的 PAM,0.35% 的清水溶液 PAM 黏度从 $48 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 提高到 $69 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,说明加入 2 种疏水单体的 PAM 的增稠效果更好。

由抗盐性能测试可知,加入 ODAAC 的四元共聚物相比 AM+AA+AMPS 三元共聚物,抗盐性能明显改善,溶液黏度从逐渐降低的趋势变成逐渐增加的趋势,而加入 SMA 的 PAM 在盐水中的黏度比 AM+AA+AMPS 三元共聚物黏度呈降低趋势,说明单纯非离子单体 SMA 对 PAM 抗盐未起作用,而同时加入 ODAAC 和 SMA 的 PAM 的抗盐性能与 AM+AA+AMPS 三元共聚物相比有明显提高,80 000 $\mu\text{g/g}$ 矿化水中黏度由 $15 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 增加到 $78 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,黏度增长值大于单纯加入阳离子单体 ODAAC 的盐水溶液黏度,这是因为非离子长链由于不带电荷,因此可以在水溶液中充分伸展,给阳离子疏水单体长链的伸展提供空间,在很大程度上促进了 PAM 分子链的溶解和充分伸展,说明阳离子疏水单体 ODAAC 和非离子单体 SMA 在抗盐作用上具有协同增效作用。

2.5 热稳定性测试

4 种 PAM 热重性能测试结果如图 8 所示。



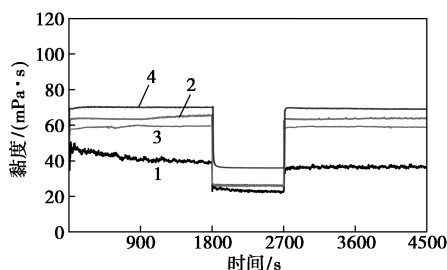
1—AM+AA+AMPS; 2—AM+AA+AMPS+ODAAC;
3—AM+AA+AMPS+SMA; 4—AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA

图 8 4 种 PAM 热重性能测试

由图 8 可知,随着温度的升高,AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA 合成的 PAM 分解基本分为 3 个阶段:第 1 阶段是 200℃ 以前,主要是 PAM 粉末中所含残余水分挥发及小分子溶剂分解所引起的失重,失重约 6.13%;第 2 阶段是 200~320℃,PAM 分子链开始分解,失重约 15.59%;第 3 阶段是 320~500℃,PAM 的主链和侧链开始分解,造成的失重占比也是热重测试中最多的,失重约 50.55%。当温度大于 500℃ 时,PAM 的质量基本保持不变,PAM 质量保持在 27.73%,而 AM+AA+AMPS、AM+AA+AMPS+ODAAC 和 AM+AA+AMPS+SMA 的质量依次保持在 12.38%、18.73% 和 22.69%,AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA 所形成的 PAM 耐温稳定性最好,说明 ODAAC 和 SMA 的加入对于 PAM 分子链的耐温性能具有增强作用,疏水单体的长支链可以提高 PAM 的热稳定性。

2.6 流变性能测试

4 种 PAM 0.35% 清水溶液变剪切测试结果如图 9 所示。



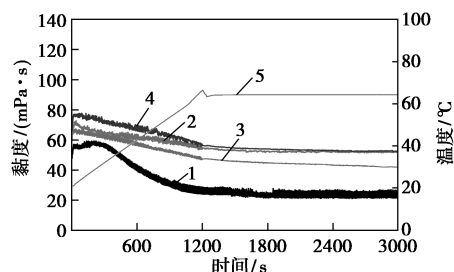
1—AM+AA+AMPS; 2—AM+AA+AMPS+ODAAC;
3—AM+AA+AMPS+SMA; 4—AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA

图 9 4 种 PAM 0.35% 清水溶液变剪切测试

由图 9 可知,在 30℃ 条件下,通过改变剪切频率对 4 种 PAM 的抗剪切性能进行测试,三元共聚物 AM+AA+AMPS 在 170 s⁻¹ 剪切 1 800 s、510 s⁻¹ 剪切

900 s、170 s⁻¹ 剪切 1 800 s 的过程中,其 0.35% 的聚合物溶液黏度随着剪切时间的延长,其溶液的黏度一直下降,而对于加入疏水单体 ODAAC 和 SMA 的四元共聚物 AM+AA+AMPS+ODAAC、AM+AA+AMPS+SMA 和五元共聚物 AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA,其剪切前后溶液的黏度基本保持不变,这是因为加入 ODAAC 和 SMA 的 PAM 酰胺水溶液中疏水长链的缔和作用形成了三维网络结构,在剪切作用下发生变形,在剪切作用力过后可迅速恢复原来的结构,所以宏观上其溶液的表现黏度基本保持不变,而未加入 ODAAC 和 SMA 的三元共聚物 AM+AA+AMPS,在剪切作用下,聚合物分子的主链和侧链会发生断裂,导致聚合物溶液黏度降低。

4 种 PAM 耐剪切性能测试结果如图 10 所示。



1—AM+AA+AMPS; 2—AM+AA+AMPS+ODAAC; 3—AM+AA+AMPS+SMA; 4—AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA; 5—温度

图 10 4 种 PAM 耐剪切性能测试

由图 10 可知,在 90℃ 条件下对 4 种 PAM 进行耐剪切测试,在升温过程中,三元共聚物 AM+AA+AMPS 的黏度迅速下降;而加入 ODAAC 和 SMA 的聚合物的黏度相对下降较慢;同时加入 ODAAC 和 SMA 及单独加入 ODAAC 的 0.35% 的五元共聚物和四元共聚物的清水溶液在 90℃ 条件下剪切 1 800 s 后的黏度依然保持在 50 mPa·s 以上,说明其具有良好的耐温耐剪切能力,同时也说明 ODAAC 与 SMA 在 PAM 的耐温耐剪切也具有协同增效作用,但 ODAAC 对 PAM 的耐温耐剪切性能起主要作用。

3 结论

(1) 以 AM、AA、AMPS、长链阳离子单体 ODAAC 和非离子单体 SMA 为聚合单体,通过水溶液聚合分别制备出 4 种 PAM,通过红外测试对其结构进行表征,证明单体都发生了聚合反应。通过在清水中的溶解性能对比测试,ODAAC 和 SMA 对 PAM 溶液都有增稠作用,SMA 的加入加快了疏水缔合 PAM 的溶解速度。

(下转第 228 页)

参考文献

- [1] Dejanovi I, Matija L, Evi L O. Dividing wall column—A breakthrough towards sustainable distilling [J]. Chemical Engineering and Processing, 2010, 49(6): 559–580.
- [2] Kiss A A. Distillation technology—still young and full of breakthrough opportunities [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2014, 89(4): 479–498.
- [3] Stankiewicz A, Moulijn J A. Process intensification [J]. Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017, 41(8): 509–518.
- [4] Kaibel D I G. Distillation columns with vertical partitions [J]. Chemical Engineering & Technology, 1987, 10(1): 92–98.
- [5] Dwivedi D, Halvorsen I J, Skogestad S. Control structure selection for four-product Petlyuk column [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 67: 49–59.
- [6] Kiss A A, Ignat R M, Landaeta S J, et al. Intensified process for aromatics separation powered by Kaibel and dividing-wall columns [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 67: 39–48.
- [7] Niggemann G, Hiller C, Fieg G. Experimental and theoretical studies of a dividing-wall column used for the recovery of high-purity products [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(23): 12331–12331.
- [8] Ghadrani M, Halvorsen I J, Skogestad S. Optimal operation of Kaibel distillation columns [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(8): 1382–1391.
- [9] Mutalib M I A, Zeglam A O, Smith R. Operation and control of dividing wall distillation columns; Part 2: Simulation and pilot plant studies using temperature control [J]. Chemical Engineering Research & Design, 1998, 76(3): 319–334.
- [10] Dwivedi D, Strandberg J P, Halvorsen I J, et al. Steady-state and dynamic operation of four-product dividing-wall (Kaibel) columns: Experimental verification [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(48): 15696–15709.
- [11] 王志锋, 沈海涛, 潘蓉, 等. 分壁精馏塔分离四元醇体系的稳态研究 [J]. 石油学报: 石油加工, 2017, 33(1): 129–137.
- [12] Qian X, Jia S K, Skogestad S, et al. Control structure selection for four-product Kaibel column [J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 93: 372–381.
- [13] Fan G L, Jiang W D, Qian X. Comparison of stabilizing control structures for four-product Kaibel column [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016, 109: 675–685.
- [14] 邱洁, 华涛, 何桂春, 等. Kaibel 分壁精馏塔的压力补偿-温度控制 [J]. 化工学报, 2018, 69(11): 310–325.
- [15] Zang L J, Huang K J, Guo T, et al. Temperature inferential control of a reactive distillation column with double reactive sections [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, (4): 896–904. ■

(上接第 218 页)

(2) 通过 4 种 PAM 的抗盐性能对比测试发现, 对于五元 PAM (AM+AA+AMPS+ODAAC+SMA) 而言, 0.35% PAM 在 80 000 $\mu\text{g/g}$ 矿化水中的黏度可达 78 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 在 10% 氯化钙水溶液中黏度可达 60 $\text{mPa}\cdot\text{s}$; 说明该 PAM 具有良好的抗盐性能; 并且证明疏水缔合 PAM 中起抗盐作用的单体为长链阳离子单体 ODAAC, SMA 与 ODAAC 在抗盐性能上具有协同增效的作用。

(3) 通过热重和流变性能测试表明, 同时加入 ODAAC 和 SMA 的 PAM 的热稳定性最高, 0.35% 的基液在 170 s^{-1} 、90 $^{\circ}\text{C}$ 条件下剪切 1 800 s 后, 黏度仍然大于 50 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, 说明该五元共聚物具有良好的耐温耐剪切能力。

参考文献

- [1] 赵禧阳, 李小瑞, 马国艳. 疏水缔合两性 PAM 的制备及性能评价 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 18–22.
- [2] Sakar, Sarvenhan, Morris, et al. Polymer flooding and its combinations with other chemical injection methods in enhanced oil recovery [J]. Polymer Bulletin, 2018, 75(4): 1753–1774.
- [3] 封明明, 李世伟, 苟绍华, 等. 四种丙烯酰胺疏水缔合共聚物合成及性能研究 [J]. 精细石油化工, 2016, 33(5): 9–15.
- [4] Li Fan, Luo Yue, Hu Pan, et al. Study on the self-assembly properties of surface active hydrophobically associating polyacrylamide with nonionic surfmer units [J]. Polymer Bulletin, 2017, 74(7): 2873–2886.
- [5] Liu Rui, Pu Wanfen, Sheng J J, et al. Star-like hydrophobically associative polyacrylamide for enhanced oil recovery: Comprehensive properties in harsh reservoir conditions [J]. Taiwan Institute Chem Eng, 2017, 80: 639–649.
- [6] 田宜灵, 邱丽娟, 曹利千, 等. 疏水缔合 PAM 临界胶束浓度的测定及微观结构的研究 [J]. 天津大学学报, 2016, 49(1): 9–14.
- [7] 王桂芹, 陈涛, 张蕊, 等. 新型耐温抗盐疏水缔合 PAM 的制备及性能 [J]. 石油化工, 2020, 49(7): 657–663.
- [8] 曹绪龙, 胡岳, 宋新旺, 等. PAM 类疏水缔合物的增黏因素研究 [J]. 高等学校化学学报, 2014, (9): 2037–2042.
- [9] 陈磊, 鲍文辉, 郭布民, 等. 耐高温海水基压裂液稠化剂性能评价 [J]. 油田化学, 2020, 37(1): 17–21, 28.
- [10] 钟传蓉, 黄荣华, 代华. 疏水改性丙烯酰胺共聚物在水溶液中的缔合 [J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(5): 88–91. ■