

新型高温纳米 SiO₂ 降黏剂的合成与性能评价

程云龙*

(中石化华东油气分公司泰州采油厂, 江苏泰州 225300)

摘要:利用硅烷偶联剂 KH550 对纳米 SiO₂ 进行改性, 并加入 MA、SSS、AA 和 AMPS 单体成功合成了一种新型改性纳米 SiO₂ 降黏剂。利用红外光谱仪、热重分析仪和扫描电镜对合成的改性纳米 SiO₂ 降黏剂进行表征, 并优化了新型降黏剂合成的单体质量比、反应温度、反应时间、单体质量分数、引发剂质量分数和合成环境 pH; 研究了 JN-54 和新型改性纳米 SiO₂ 降黏剂的加量、实验温度和剪切速度对降黏效果的影响。结果表明, 最佳合成条件为: 单体质量比 $m(\text{AMPS}) : m(\text{MA}) : m(\text{SSS}) : m(\text{AA}) : m(\text{SiO}_2) = 7.5 : 3 : 13.5 : 4 : 2$ 或 $7 : 2.5 : 13 : 3.5 : 4$, 单体质量分数为 30%、反应温度为 40℃、pH 为 6.5、引发剂质量为单体总质量的 0.3%、反应时间为 8 h; 改性纳米 SiO₂ 降黏剂在 110℃、100 s⁻¹ 条件下降黏率仍可达到 98.7% 且最佳质量分数为 1.5%; 对比 JN-54, 改性纳米 SiO₂ 降黏剂有更好的降黏效果和耐温耐剪切性能。

关键词:稠油开发; 改性; 聚合反应; 纳米 SiO₂ 降黏剂; 耐温耐剪切

中图分类号: TE357

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S2-0303-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.054

Synthesis and performance evaluation of a novel high temperature nano SiO₂ viscosity reducer

CHENG Yun-long*

(Taizhou Oil Production Plant, Sinopec East China Oil & Gas Company, Taizhou 225300, China)

Abstract: A new type of modified nano SiO₂ viscosity reducer is successfully synthesized through modifying nano SiO₂ with silane coupling agent (KH550) and adding MA, SSS, AA and AMPS monomers, and characterized by means of infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis and scanning electron microscopy. The mass ratio of monomers, reaction temperature, reaction time, mass fractions of monomers, mass fraction of initiator and synthetic environment pH for the synthesis of the new viscosity reducer are optimized. The influences of the dosages of JN-54 and the new modified nano-SiO₂ viscosity reducer, experimental temperature and shear rate on the viscosity reduction effect are studied. The optimum synthesis conditions are determined as follows: $m(\text{AMPS}) : m(\text{MA}) : m(\text{SSS}) : m(\text{AA}) : m(\text{SiO}_2) = 7.5 : 3 : 13.5 : 4 : 2$ or $7 : 2.5 : 13 : 3.5 : 4$, mass fraction of monomers is 30%, reaction temperature is 40℃, pH = 6.5, mass fraction of initiator is 0.3% of the total monomer mass, and reaction time is 8 h. The viscosity reduction rate of the modified nano-SiO₂ viscosity reducer can still reach 98.7% at 110℃ and 100 s⁻¹, and the optimum mass fraction is 1.5%. Compared with JN-54, the modified nano-SiO₂ viscosity reducer has better viscosity reduction effect, temperature resistance and shear resistance.

Key words: heavy oil development; modification; polymerization reaction; nano SiO₂ viscosity reducer; temperature and shear resistances

随着油气开发技术的发展, 常规油尤其是轻质原油产量逐渐下降, 常规油的开发难以满足我国的原油需求, 近年来人们着眼于稠油油藏和非常规油气藏的开发, 其中稠油油藏储量丰富, 已探明的稠油储量是常规轻质油储量的 6~7 倍^[1-3]。我国是一个原油消耗大国, 且原油对外依存度高达 65% 以上, 因此高质量有效地开发稠油油藏是解决我国能源需求的重要途径, 而稠油开发中需要解决稠油黏度高、流动困难的难题。国内外常用的降黏方法有物理降

黏和化学降黏^[4-9], 物理降黏成本及能耗高、现场实施难度大、降黏有效期短, 相对于化学降黏在应用上受到较大的限制, 目前化学降黏法中应用较广的是加降黏剂^[10-12]。

根据稠油胶质和沥青质质量分数高的特点, 笔者选择带有磺酸基团、苯环等特殊基团的酰胺类单体马来酸酐、苯乙烯磺酸钠、丙烯酸、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸和利用硅烷偶联剂 KH550 改性后的纳米 SiO₂ 合成一种新型改性纳米 SiO₂ 降黏

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-07-10

作者简介: 程云龙 (1995-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为油藏工程、提高采收率理论与技术, 通讯联系人, 18155922861@163.com。

剂。利用红外光谱、热重分析和扫描电镜对合成的新型降黏剂进行表征,并优化了新型降黏剂合成的单体质量比、反应温度、反应时间、单体总质量分数、引发剂质量分数和合成环境 pH;与现场应用降黏剂 JN-54 对比,研究了降黏剂加量、温度和剪切速度对降黏效果的影响。

1 实验部分

1.1 药品与仪器

实验药品:纳米 SiO₂、硅烷偶联剂 KH550、无水乙醇、马来酸酐(MA)、苯乙磺酸钠(SSS)、丙烯酸(AA)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)、偶氮二异丁腈盐酸盐(AIBA),上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;JN-54 降黏剂,扬州润达油田化学剂有限公司生产;草舍油田稠油油样:胶质和沥青质质量分数为 10.33%,蜡质量分数为 19.27%,黏度为 6 937.92 mPa·s(地层温度为 50℃),密度为 0.97 g/cm³。

实验仪器:三颈烧瓶;JA5003B 型电子分析天平、DF-101S 型油水两用恒温集热式磁力搅拌器,上海精密仪器仪表有限公司生产;TES-1004/10 型超声清洗机,昆山市超声仪器有限公司生产;TRACKER-H 型泰克利斯界面流变仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司生产;烧杯、量筒、滴管等。

1.2 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的合成

1.2.1 纳米 SiO₂ 的改性

室温下向乙醇水溶液中加入适量的硅烷偶联剂 KH550,调节恒温集热式磁力搅拌器的搅拌速度为 100~150 r/min,水解 1 h 后,加入定量的纳米 SiO₂,调节温度为 80℃,恒温条件下反应 3 h。反应结束后,将产物离心分离并用无水乙醇清洗烘干,得到改性纳米 SiO₂^[13-17]。

1.2.2 纳米 SiO₂ 降黏剂的合成

(1)向三颈烧瓶中加入定量去离子水,然后依次加入定量 AMPS、MA、SSS、AA 单体溶解并搅拌均匀,加入定量改性纳米 SiO₂ 搅拌均匀。

(2)加入 NaOH 颗粒或 NaOH 标准溶液,调节 pH 至 6~7。

(3)将水浴温度调至 40℃,控制搅拌速度为 250~300 r/min,向反应釜中通氮气,进行除氧 20~30 min。

(4)加入引发剂 AIBA,用橡胶塞塞住瓶口,反应 8~10 h 关闭搅拌器。

(5)取出(4)中得到的凝胶,用剪刀或破壁机切碎,用酒精清洗后放入 40℃ 真空干燥箱,干燥后取出研磨成粉末状,得到改性纳米 SiO₂ 降黏剂^[18-20]。

1.3 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的表征

利用红外光谱仪、热重分析仪和扫描电镜对聚合物进行表征^[21-22]。通过红外光谱仪分析确认该产物是否具有目标产物具备的官能团;通过热重分析仪确认合成产物的耐温性能^[23];通过扫描电镜表征聚合产物的微观结构^[24]。

1.4 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的性能研究

实验温度为 50℃ 时评价降黏剂对稠油油样的降黏效果^[25-26](中石化 Q/SHCG 65—2013《稠油降黏剂技术要求》),并与油田现场所用降黏剂 JN-54 进行对比。利用哈克流变仪测定混合体系的黏度,降黏率计算式为:

$$f = [(\mu_0 - \mu) / \mu_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: f 为降黏率,%; μ_0 为 50℃ 时稠油油样的黏度, mP·s; μ 为加入降黏剂后的体系黏度, mP·s。

2 结果与讨论

2.1 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的表征

2.1.1 红外光谱分析

改性纳米 SiO₂ 降黏剂的红外光谱图如图 1 所示。

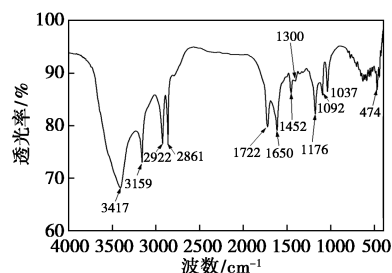


图 1 纳米降黏剂红外光谱图

从图 1 中可以看出,3 417 cm⁻¹ 和 3 159 cm⁻¹ 分别是—N 的反对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰;2 922 cm⁻¹ 和 2 861 cm⁻¹ 为—CH 的伸缩振动峰;1 722 cm⁻¹ 是—C=O 的特征吸收峰;1 650 cm⁻¹ 和 1 452 cm⁻¹ 是苯环的特征吸收峰;1 300 cm⁻¹ 是—CN 的吸收峰;1 176 cm⁻¹ 和 1 037 cm⁻¹ 是苯环的特征吸收峰;1 092 cm⁻¹ 为 Si—O—Si 反对称伸缩振动峰,474 cm⁻¹ 是 Si—O—Si 的弯曲振动峰。根据分析结果,红外光谱显示出现了 MA、SSS、AA、AMPS 单体和纳米 SiO₂ 中的特征吸收峰,表明利用几种单体成功合成了改性纳米 SiO₂ 降黏剂。

2.1.2 热重分析

纳米降黏剂的 TG 曲线如图 2 所示。

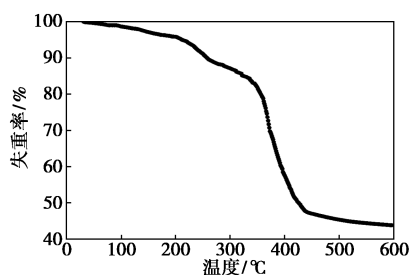


图 2 纳米降黏剂的 TG 曲线

从图 2 中可以看出,随着温度的不断上升,聚合物的质量逐渐降低。在 40~210℃之间,由于聚合物分子中的结晶水在高温下蒸发,热重曲线发生阶段性的降低,质量损失 4.64%;210~440℃,由于聚合物分子链在高温下发生分解,热重曲线出现急剧下降,质量损失 47.59%。由分析可知,聚合产物的耐温性能较好,在 210℃以下分子结构不发生变化。

2.1.3 扫描电镜分析

纳米降黏剂的扫描电镜图如图 3 所示。

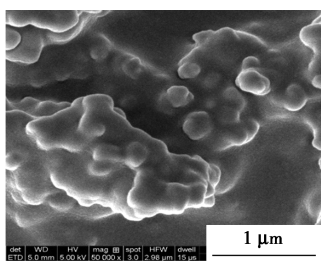


图 3 纳米降黏剂的扫描电镜图

从图 3 中可以看出,聚合物呈线性或片状分布,表面有轮廓模糊的球形颗粒附着,说明表面光滑的球形纳米 SiO₂ 被成功接枝改性,且被成功聚合在新型纳米降黏剂的分子链上。

2.2 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的合成条件优化

通过实验研究单体质量比、反应温度、反应时间、单体总质量分数、引发剂质量分数和合成环境 pH 对降黏性能的影响,对改性纳米 SiO₂ 降黏剂的合成条件进行优化。

2.2.1 单体质量比对降黏性能的影响

设置单体质量分数为 30%、反应温度为 40℃、pH 为 6.5、引发剂质量为单体总质量的 0.3%、反应时间为 8 h,改变聚合单体的质量比,测试改性纳米 SiO₂ 降黏剂对稠油的降黏效果。测试改性纳米 SiO₂ 降黏剂的降黏效果时,选择加入 1.5% 的降黏剂,实验温度 50℃,无剪切,不同实验组的结果如

表 1 所示。

表 1 单体质量比对降黏率的影响

编号	$m(\text{AMPS})/$ %	$m(\text{MA})/$ %	$m(\text{SSS})/$ %	$m(\text{AA})/$ %	$m(\text{SiO}_2)/$ %	降黏 率/%
1	8.0	2.0	16.0	3.0	1	91.4
2	8.0	3.0	14.0	4.0	1	92.1
3	10.0	3.0	12.0	4.0	1	84.7
4	10.0	4.0	10.0	5.0	1	81.2
5	8.0	5.0	10.0	6.0	1	70.8
6	7.5	2.0	15.5	3.0	2	93.8
7	7.5	3.0	13.5	4.0	2	95.8
8	9.5	3.0	11.5	4.0	2	85.3
9	9.5	4.0	9.5	5.0	2	82.7
10	7.5	5.0	9.5	6.0	2	72.4
11	7.0	1.5	15.0	2.5	4	92.2
12	7.0	2.5	13.0	3.5	4	96.0
13	9.0	2.5	11.0	3.5	4	86.8
14	9.0	3.5	9.0	4.5	4	83.8
15	7.0	4.5	9.0	5.5	4	73.8

从表 1 中可以看出,当聚合单体质量比为 $m(\text{AMPS}) : m(\text{MA}) : m(\text{SSS}) : m(\text{AA}) : m(\text{SiO}_2) = 7.5 : 3 : 13.5 : 4 : 2$ 或 $7 : 2.5 : 13 : 3.5 : 4$ 时降黏效果较好,分别达到 95.8% 和 96%。对比实验组 1、6、11,适当提高 SiO₂ 的质量分数,降低 AMPS 和 SSS 的质量分数可提高产物的降黏性能,但是继续提高 SiO₂ 的质量分数,产物的降黏性能几乎不变甚至变差,说明 SiO₂ 对稠油降黏的促进作用存在一个合理的作用范围。

2.2.2 反应温度对降黏性能的影响

确定单体质量比 $m(\text{AMPS}) : m(\text{MA}) : m(\text{SSS}) : m(\text{AA}) : m(\text{SiO}_2) = 7 : 2.5 : 13 : 3.5 : 4$,保持其他条件不变,反应温度对降黏性能的影响如图 4 所示。

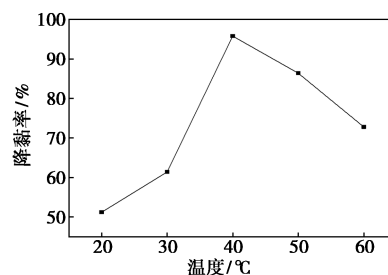


图 4 反应温度对降黏性能的影响

从图 4 中可以看出,合成产物的降黏率呈现先升高后降低的趋势。反应温度为 20℃ 和 30℃ 时,合成产物的降黏率为 51.2% 和 61.4%;反应温度为 40℃ 时,合成产物的降黏率有较大幅度的升高,降黏率为 95.8%。这是因为反应温度较低时,引发剂引发效果较差,未产生足够的自由基,反应后的聚合物聚合度不够,导致合成产物的降黏效果较差。当反应温度大于 40℃ 时,合成产物的降黏效果逐渐下降,这是由于温度过高,聚合速度过快,在产生足够的自由基之前,聚合反应已基本完成,甚至会发生爆聚现象,导致合成产物分子质量过低,降黏效果较差。

2.2.3 反应时间对降黏性能的影响

反应时间对降黏性能的影响如图 5 所示。

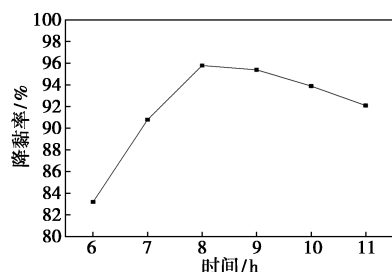


图 5 反应时间对降黏性能的影响

从图 5 中可以看出,反应时间从 6 h 增加至 11 h,合成产物的降黏效果先上升后下降。反应时间为 6 h 时,聚合反应未完成,合成产物的分子质量较低,不能在胶质周围形成可靠的溶剂化层,降黏效果一般;反应时间为 8 h 时,降黏效果最好,降黏率达到 95.6%;反应时间继续增加,降黏率逐渐下降,这是因为随着反应时间增加,聚合单体间、聚合物分子间发生二次交联,合成产物的分子质量过大,降黏效果下降。

2.2.4 单体总质量分数对降黏性能的影响

单体质量分数对降黏性能的影响如图 6 所示。

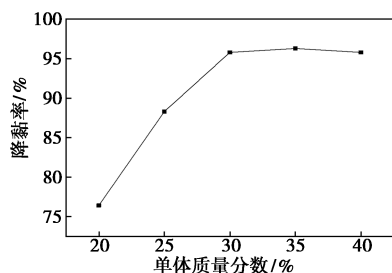


图 6 单体质量分数对降黏性能的影响

从图 6 中可以看出,反应单体的质量分数从 20% 升高至 40%,合成产物的降黏效果逐渐上升后

趋于稳定。这是由于反应单体的质量分数升高,单体间碰撞反应加剧,聚合反应的聚合度升高,产物降黏效果提高;受分子间作用力的影响,反应单体的质量分数升高后,单体间的碰撞反应达到饱和状态,产物的降黏效果趋于稳定;当反应单体的质量分数大于 35%,聚合单体间、聚合物分子间发生二次交联,合成产物的分子质量过大,导致降黏效果略有下降。

2.2.5 引发剂质量分数对降黏性能的影响

引发剂质量分数对降黏性能的影响如图 7 所示。

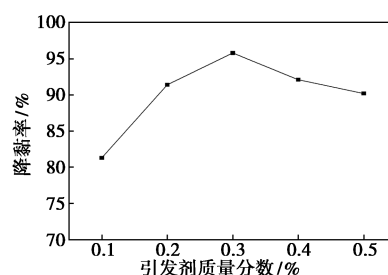


图 7 引发剂质量分数对降黏性能的影响

从图 7 中可以看出,引发剂质量分数从 0.1% 增加至 0.5%,合成产物的降黏效果先上升后下降。引发剂质量分数过少时,引发后产生的自由基过少,反应速率慢,聚合度小;引发剂质量分数为 0.3% 时,降黏效果最好,为 95.8%;引发剂质量分数大于 0.3% 时,反应速率过快,产物分子质量下降,导致降黏效果略有降低,总体在 90% 以上。

2.2.6 合成环境 pH 对降黏性能的影响

合成环境 pH 对降黏性能的影响如图 8 所示。

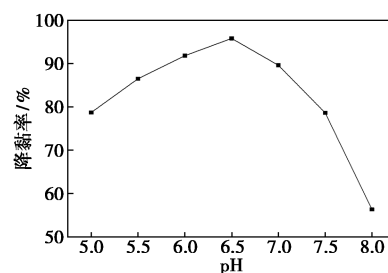


图 8 pH 对降黏性能的影响

从图 8 中可以看出,随着 pH 从 5.0 升高至 8.0,降黏率曲线先升高后快速降低。当合成环境酸性较强时,亚胺化严重,产生二次交联,产物分子质量升高,但分子结构发生变化,溶解性变差。当 pH 为 5 时,降黏率为 78.7%;当 pH 升高至 6.5 时,降黏效果最好,达到 95.8%;当 pH 大于 6.5 时,酰胺类单体水解影响反应过程,产物分子质量较低,导致

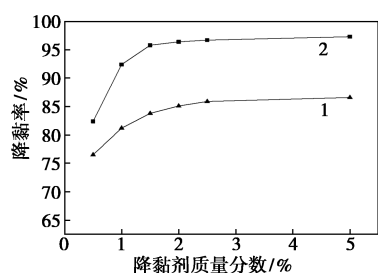
降黏效果下降。

综上,改性纳米 SiO₂ 降黏剂的最优合成条件为: $m(\text{AMPS}):m(\text{MA}):m(\text{SSS}):m(\text{AA}):m(\text{SiO}_2)=7.5:3:13.5:4:2$ 或 $7:2.5:13:3.5:4$ 、单体质量分数为 30%、反应温度为 40℃、pH 为 6.5、引发剂质量为单体总质量的 0.3%、反应时间为 8 h。

2.3 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的性能评价

2.3.1 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的质量分数对降黏性能的影响

50℃时 JN-54 和改性纳米 SiO₂ 降黏剂质量分数对降黏性能的影响如图 9 所示。



1—JN-54; 2—纳米降黏剂

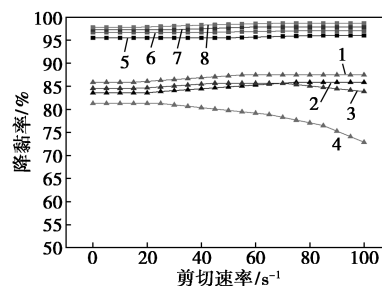
图 9 降黏剂的质量分数对降黏性能的影响(50℃)

从图 9 中可以看出,向稠油体系中加入不同质量分数的 JN-54 和改性纳米 SiO₂ 降黏剂,随着加入质量分数的增加,降黏效果先快速上升然后趋于平缓,这是因为加入降黏剂后,稠油从油包水型乳状液转化成水包油型乳状液,在胶质沥青质外生成水膜提高了稠油的流动性。JN-54 质量分数小于 2.5% 时,质量分数增大有利于提高降黏效果;JN-54 质量分数大于 2.5% 时,降黏效果几乎没有变化。改性纳米 SiO₂ 降黏剂质量分数小于 1.5% 时,随着质量分数的增加,降黏效果快速上升;改性纳米 SiO₂ 降黏剂质量分数大于 1.5% 时,降黏剂分子在稠油体系中的作用达到饱和,继续增加降黏剂后降黏效果几乎没有变化,且改性纳米 SiO₂ 降黏剂的降黏效果一直高于 JN-54,说明改性纳米 SiO₂ 降黏剂的降黏效果比 JN-54 更好。这是由于改性纳米 SiO₂ 降黏剂中含有苯环结构,苯环与胶质和沥青质分子结构中的芳香多环形成 $\pi-\pi$ 作用,改变了稠油分子内部结构中存在的氢键、范德华力等作用力;改性纳米 SiO₂ 降黏剂中的硅烷醇基纳米颗粒可吸引稠油分子内的胶质和沥青质分子,纳米 SiO₂ 颗粒比表面积大、粒径小、分散性好,容易渗透进入稠油分子内部且吸附在胶质沥青质聚集体表面,夺走稠油氢键中

的氢形成新的氢键,破坏稠油分子内部结构,有效降低稠油的黏度。

2.3.2 温度和剪切速率对降黏性能的影响

在实验温度为 50、70、90℃ 和 110℃,剪切速率为 1~100 s⁻¹ 条件下研究 JN-54 和改性纳米 SiO₂ 降黏剂的性能。温度和剪切速率对降黏性能的影响如图 10 所示。



1—JN-54 50℃; 2—JN-54 70℃; 3—JN-54 90℃;
4—JN-54 110℃; 5—纳米降黏剂 50℃; 6—纳米降黏剂 70℃;
7—纳米降黏剂 90℃; 8—纳米降黏剂 110℃

图 10 温度和剪切速率对降黏性能的影响

从图 10 中可以看出, JN-54 和改性纳米 SiO₂ 降黏剂对温度和剪切速率的敏感性有较大差异。改性纳米 SiO₂ 降黏剂的降黏效果随温度和剪切速率升高均有不同幅度的升高。随剪切速率升高,实验温度为 50、70、90℃ 和 110℃ 时的增幅分别为 0.48%、0.55%、0.6% 和 0.92%,且改性纳米 SiO₂ 降黏剂在 110℃、100 s⁻¹ 条件下降黏率达到最大值 98.7%;同一剪切速率下,升高温度对降黏剂的降黏效果有促进作用,这是由于升高温度时,稠油体系中的胶质和沥青质分子间距增大,同时剪切搅拌的作用有利于降黏剂分子均匀混入稠油体系中,降黏效果更好,即降黏剂的耐温耐剪切性能较好。

由于剪切搅拌作用, JN-54 的降黏效果在 50℃ 和 70℃ 时,随着剪切速率的升高有较小幅度的升高;90℃ 时, JN-54 的降黏效果略有上升而后开始下降;110℃ 时, JN-54 的降黏效果随剪切速率升高逐渐下降。这是因为温度和剪切速率升高后, JN-54 分子因高温和剪切应力受到破坏,且同一剪切速率下,升高温度时 JN-54 的降黏效果先上升后下降。说明升高温度和剪切搅拌作用可以在一定程度上促进降黏的效果,但继续升高温度和剪切速率,反而会破坏 JN-54 中的降黏分子影响降黏效果。结果表明改性纳米 SiO₂ 降黏剂的耐温耐剪切性能优于 JN-54。

3 结论

(1) 通过 AMPS、MA、SSS、AA 和改性纳米 SiO₂ 合成了一种新型改性纳米 SiO₂ 降黏剂, 并利用红外光谱、热重分析和扫描电镜对其进行了表征。

(2) 合成了一种改性纳米 SiO₂ 降黏剂, 且优化了合成条件为: $m(\text{AMPS}) : m(\text{MA}) : m(\text{SSS}) : m(\text{AA}) : m(\text{SiO}_2) = 7.5 : 3 : 13.5 : 4 : 2$ 或 $7 : 2.5 : 13 : 3.5 : 4$, 单体质量分数为 30%, 反应温度为 40℃, pH 为 6.5, 引发剂质量为单体总质量的 0.3%, 反应时间为 8 h。

(3) 合成的改性纳米 SiO₂ 降黏剂在高温剪切条件下仍具有较好的降黏性能, 可与加热降黏法结合使用。

(4) 通过对比, 改性纳米 SiO₂ 降黏剂的最佳质量分数为 1.5%, 降黏效果优于 JN-54, 且耐温耐剪切性能更好。

参考文献

- [1] 王绪超. 石油稠油降黏计算研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [2] 陈秋芬, 王大喜, 刘然冰. 油溶性稠油降黏剂研究进展 [J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(2): 45-48, 49.
- [3] Farouq A S M. Heavy oil-evermore mobile [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2003, 37(1): 5-9.
- [4] Guo K, Li H L, Yu Z X. In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: A review [J]. Fuel, 2016, 185(8): 886-902.
- [5] Muraza O, Galadima A. Aquathermolysis of heavy oil: A review and perspective on catalyst development [J]. Fuel, 2015, 157(5): 219-231.
- [6] Al-adili A, Azeez R A, Al-zuhairi F K. A comparative investigation on viscosity reduction of heavy crude oil using organic solvents [J]. International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, 2020, 10(4): 18517-18525.
- [7] 全红平, 赵泽龙, 冯小刚, 等. 油溶性稠油降黏剂 SMA/NVP/MA/TA 的合成与评价 [J]. 现代化工, 2022, 42(S2): 332-337.
- [8] 杨斌. 聚合物降黏剂的性能及其提高采收率效果 [J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 107-113.
- [9] Li H Y, Cui K X, Jin L, et al. Experimental study on the viscosity reduction of heavy oil with nano-catalyst by microwave heating under low reaction temperature [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2018, 170(6): 374-382.
- [10] 雷斌. 稠油降黏催化剂的研制及性能评价 [J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(6): 56-60, 74.
- [11] 熊钰, 冷傲燃, 孙业恒, 等. 水溶性分散型降黏剂降黏及微观驱油机理 [J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(5): 62-70.
- [12] 毛金成, 刘佳伟, 李勇明, 等. 超稠油化学降黏剂研究与进展 [J]. 应用化工, 2016, 45(7): 1367-1371.
- [13] Qin B, Zhao L, Jiang J L. Study on viscosity reducing and oil displacement agent for water-flooding heavy oil reservoir [J]. China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 2022, 24(1): 11-18.
- [14] 王大威, 靖波, 梁守成, 等. 掺稀降黏技术研究及其在渤海 Q 油田应用评价 [J]. 现代化工, 2019, 39(11): 175-179.
- [15] 张开亮, 姜仁龙, 张宏民, 等. 纳米 KH550-C18/SiO₂ 复合粒子稠油降黏剂的制备及应用性能 [J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(6): 50-55.
- [16] 汪溢, 胡泽文, 付美龙, 等. 稠油掺活性水降黏集输工艺研究 [J]. 现代化工, 2018, 38(1): 217-219, 221.
- [17] Zhao M W, Cheng Y L, Wu Y N, et al. Enhanced oil recovery mechanism by surfactant-silica nanoparticles imbibition in ultra-low permeability reservoirs [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 348(9): 118010-118024.
- [18] 杨敏, 汪健, 张宏民, 等. 纳米聚(二乙烯苯-甲基丙烯酸十八酯)降黏剂的合成及其降黏效果 [J]. 石油学报(石油加工), 2013, 29(5): 881-884.
- [19] 青玉泉, 杨明君, 李垒, 等. 改性纳米二氧化硅复合降黏剂的制备与性能评价 [J]. 现代化工, 2020, 40(2): 153-156, 161.
- [20] 张兴英, 程珏, 赵京波. 高分子化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [21] 徐经纬. 波谱分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 王斌, 陈集, 饶小桐. 现代分析测试方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [23] Esmaili S, Sarma H, Harding T, et al. Review of the effect of temperature on oil-water relative permeability in porous rocks of oil reservoirs [J]. Fuel, 2019, 237(10): 91-116.
- [24] Minale M, Merola M C, Carotenuto C. Effect of solvents on the microstructure aggregation of a heavy crude oil [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 177(16): 299-308.
- [25] 程云龙, 苏金未, 付强, 等. 一种阴离子-非离子表面活性剂型降黏剂的制备及性能评价 [J]. 石油化工, 2023, 52(4): 513-518.
- [26] 孙永涛, 李兆敏, 孙玉豹, 等. 稠油耐高温乳化降黏剂 AESO 的合成及其性能 [J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(3): 103-108. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿, 投稿系统: <http://www.xdhg.com.cn>