

# 油溶性稠油降黏剂 SMA/NVP/MA/TA 的合成与评价

全红平<sup>1,3\*</sup>, 赵泽龙<sup>1,3</sup>, 冯小刚<sup>2</sup>, 黄寰宇<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500;

2. 中国石油新疆油田分公司吉庆油田作业, 新疆 昌吉 831700;

3. 油气田应用化学四川省重点实验室, 四川 成都 610500)

**摘要:**以偶氮二异丁腈(AIBN)为引发剂、甲苯为溶剂,采用甲基丙烯酸十八酯(SMA)、N-乙烯基吡咯烷酮(NVP)、马来酸酐(MA)、茴香烯(TA)为原料合成四元聚合物用作降黏剂,并通过单因素实验得到最优合成条件: $n(\text{SMA}):n(\text{NVP}):n(\text{MA}):n(\text{TA})=6:2:3:3$ ,引发剂加量为单体质量的0.65%,反应温度90℃,反应时间5 h,单体浓度30%。通过傅里叶变换红外光谱仪验证其结构与最初设计结构一致。降黏剂在50℃下、加量为500 mg/L时,对稠油的降黏率可达66%;通过扫描电子显微镜对降黏前后的沥青质胶质进行观察,发现含茴香烯降黏剂可以更好地打破稠油原有的堆积结构,从而起到更好的降黏效果。

**关键词:**油溶性;降黏剂;茴香烯;聚合物

中图分类号:TE624

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)S2-0332-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.067

## Synthesis and evaluation of SMA/NVP/MA/TA, an oil-soluble viscosity-reducing agent for heavy oil

QUAN Hong-ping<sup>1,3\*</sup>, ZHAO Ze-long<sup>1,3</sup>, FENG Xiao-gang<sup>2</sup>, HUANG Huan-yu<sup>2</sup>

(1. College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Jiqing Oilfield Operation Division, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Changji 831700, China;

3. Sichuan Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Field Applied Chemistry, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** A quaternary polymer is synthesized by using stearyl methacrylate (SMA), N-vinyl-2-pyrrolidone (NVP), maleic anhydride (MA) and trans-anethole (TA) as raw materials, toluene as solvent, and azodiisobutyronitrile (AIBN) as initiator. The optimal synthesis conditions are obtained through single factor experiments as follows:  $n(\text{SMA}):n(\text{NVP}):n(\text{MA}):n(\text{TA})=6:2:3:3$ , the dosage of initiator is 0.65% of monomers mass, the reaction performs at 90℃, the reaction lasts for 5 hours, and the concentration of monomers is 30%. It is verified through Fourier transform infrared spectrometer that the structure of the quaternary polymer is consistent with the originally designed structure. At 50℃, the viscosity reduction rate of heavy oil by this quaternary polymer can reach 66% when its dosage is 500 mg·L<sup>-1</sup>. By means of scanning electron microscopy, asphaltene colloid before and after viscosity reduction is observed, and it is found that the trans-anethole-containing viscosity reduction agent can better break the original accumulation structure of heavy oil, thus playing a better viscosity reduction effect.

**Key words:** oil soluble; viscosity reduction agent; trans-anethole; polymer

原油依旧是目前世界上使用的主要能源,但是经过长时间的开采,常规原油资源也在不断减少,而稠油目前在各国的储量都十分丰富,其储量是常规原油储量的6倍以上<sup>[1-4]</sup>。但是由于黏度高,稠油的开采和运输十分困难,并且成本很高。目前常用的稠油降黏法有掺稀降黏、乳化降黏、加热降黏,但是这些降黏方法都存在着耗能高、环境污染等问题<sup>[4-9]</sup>。而油溶性降黏剂具有加量少、降黏效果好等优点,因此近年来广受关注,但是油溶性降黏剂也存在着选择性强、普适性较差等问题<sup>[9-14]</sup>,并且常规

油溶性降黏剂所选用的单体往往带有毒性,容易污染环境。从减毒环保的角度,本文采用从植物中提取的茴香烯(TA)替代常用油溶性降黏剂使用的苯乙烯单体,茴香烯分子结构中存在的醚键可以提高其苯环上的电子云密度,形成新的 $\pi-\pi$ 键,帮助降黏效果的提升。根据稠油中沥青质胶质与降黏剂作用的机理,以及稠油自身的结构特点,选择甲基丙烯酸十八酯(SMA)、N-乙烯基吡咯烷酮(NVP)、马来酸酐(MA)、茴香烯4种功能单体,采用自由基聚合的方式合成一种四元共聚物,用作油溶性降黏剂。

收稿日期:2022-01-26;修回日期:2022-04-03

作者简介:全红平(1982-),男,硕士,教授,硕士生导师,研究方向为油田化学品的研发与应用,通讯联系人,59183228@qq.com。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

DF101S 集热式磁力加热搅拌器,巩义市京华仪器有限公司;NDJ-8S 旋转黏度计、WQF-520 傅里叶变换红外光谱仪,上海精密科学仪器有限公司;ESJ220-4A 电子天平,沈阳龙腾电子有限公司。

甲基丙烯酸十八酯、*N*-乙烯基吡咯烷酮溶液、马来酸酐、茴香烯、偶氮二异丁腈、甲苯。

### 1.2 稠油四组分分析

稠油中沥青质与胶质的含量会影响稠油的黏度,由此按照行业标准《NB/SH/T0509—2010 石油沥青四组分测定法》对稠油中的四组分进行分析<sup>[8-10]</sup>,所得四组分结果如表 1 所示。

表 1 稠油四组分含量

项目	50℃黏度/ (mPa·s)	沥青质/ %	胶质/ %	饱和分/ %	芳香分/ %
测试数据	32600	9.36	20.66	29.49	40.49

由四组分分析可知稠油的黏度较高,并且胶质沥青质含量较高,属于高黏、高胶质沥青质稠油。

### 1.3 降黏剂的合成

在三颈烧瓶上接入冷凝管、温度计,将磁力搅拌子放入三颈烧瓶内,将装置好的三颈烧瓶置于油浴锅内,按一定比例加入所需单体甲基丙烯酸十八酯、*N*-乙烯基吡咯烷酮、马来酸酐、茴香烯溶于甲苯中,再转移至三颈烧瓶内,将油浴锅设置为实验所需温度,边升温边搅拌,并且观察温度计,当三颈烧瓶内溶液达到预设温度后,将溶解于甲苯中的偶氮二异丁腈控制滴入速度加入三颈烧瓶中,引发反应,保持恒温进行反应,全程保持转子旋转搅拌,当反应达到预定时间后停止加热,得到四元聚合物。图 1 为降黏剂合成示意图。

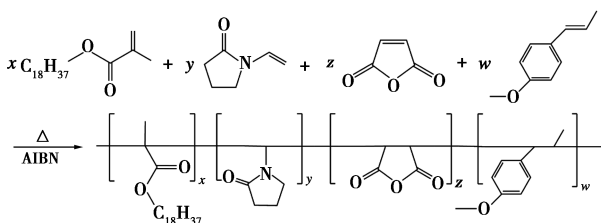


图 1 降黏剂合成示意图

### 1.4 降黏剂的表征

用红外光谱对最优条件合成的降黏剂进行分子结构表征,溴化钾压片,分辨率  $0.01\text{ cm}^{-1}$ ,波数范围

$4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 。

### 1.5 降黏剂的性能评价

首先将适量的油溶性稠油降黏剂与 1 mL 甲苯溶液混合均匀,再取 100 mL 稠油加热至  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  后恒温加热 2 h,并每隔一段时间对稠油进行搅拌,保证稠油受热均匀,测其黏度记为  $\eta_0$ ;取配制好的油溶性稠油降黏剂匀速滴入稠油中,并进行充分搅拌,保证降黏剂与稠油混合均匀,放入恒温水浴锅中进行恒温加热,保证温度在  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,期间对其进行搅拌,使降黏剂与稠油充分作用,加热 2 h 后测其黏度,记为  $\eta_1$ 。用式(1)计算降黏率:

$$\nu = [(\eta_0 - \eta_1) / \eta_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\nu$  为稠油降黏率,%; $\eta_0$  为加降黏剂前稠油的黏度,mPa·s; $\eta_1$  为加降黏剂后稠油的黏度,mPa·s。

### 1.6 降黏剂的降黏机理研究

结合所选单体的电子云密度与  $\pi-\pi$  键之间的关系,并用扫描电子显微镜(SEM)观测降黏前后的沥青质、胶质表面形态,用以评价降黏剂的效果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降黏剂合成条件优化

#### 2.1.1 降黏剂单体摩尔比的优化

单体比例会影响聚合物的分子构成,固定反应温度  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、反应时间 5 h、引发剂加量为单体质量的 0.5%、单体浓度为 30%,探究各单体摩尔比对降黏剂降黏效果的影响,结果见表 2。

表 2 单体摩尔比对降黏率的影响

$n(\text{SMA}) : n(\text{NVP}) :$ $n(\text{MA}) : n(\text{TA})$	降黏率/ %	$n(\text{SMA}) : n(\text{NVP}) :$ $n(\text{MA}) : n(\text{TA})$	降黏率/ %
2:1:2:1	49	6:2:1:1	56
4:1:2:1	55	6:2:2:1	59
6:1:2:1	57	6:2:3:1	60
8:1:2:1	54	6:2:4:1	57
10:1:2:1	50	6:2:5:1	53
6:2:2:1	59	6:2:3:2	60
6:3:2:1	54	6:2:3:3	61
6:4:2:1	52	6:2:3:4	59
6:5:2:1	50	6:2:3:5	57

由表 2 可知, $n(\text{SMA}) : n(\text{NVP}) : n(\text{MA}) : n(\text{TA}) = 6:2:3:3$ 时,得到的降黏剂有最优降黏效果,降黏率高达 61%,可将稠油黏度由  $32\ 600\text{ mPa}\cdot\text{s}$  降为  $12\ 710\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。说明所选几种单体所形成的降黏剂能达到降低稠油黏度的效果,通过引入低毒性

且苯环电子云密度更高的茴香烯代替高毒性苯乙烯的方法可行。

### 2.1.2 引发剂加量的优化

引发剂的用量会影响溶液中自由基含量,进而影响反应引发程度。由此,在  $n(\text{SMA}):n(\text{NVP}):n(\text{MA}):n(\text{TA})=6:2:3:3$ 、反应温度  $80^\circ\text{C}$ 、反应时间 5 h、单体浓度 30% 的条件下,探究引发剂加量对稠油降黏剂的影响,结果见图 2。

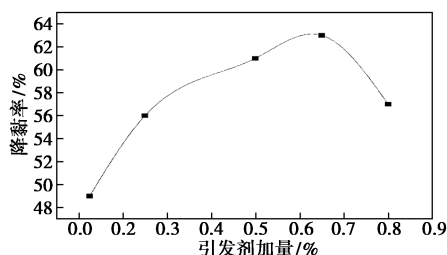


图 2 引发剂加量对降黏率的影响

由图 2 可知,随着引发剂用量的增加,降黏率先上升后下降,当引发剂用量为单体质量的 0.65% 时达到最优效果,降黏率为 63%。当引发剂浓度过低时,自由基过少,单体不能完全参与反应;而引发剂浓度过高时,产生的自由基过多,使得反应终止的几率增加,进而降低降黏效果。

### 2.1.3 反应温度的优化

反应温度会影响溶液中单体分子的运动速度以及碰撞几率,进而影响聚合反应。由此,在单体配比  $n(\text{SMA}):n(\text{NVP}):n(\text{MA}):n(\text{TA})=6:2:3:3$ 、反应时间 5 h、单体浓度 30%、引发剂加量为单体质量的 0.65% 的条件下,探讨反应温度对降黏剂的影响,结果见图 3。

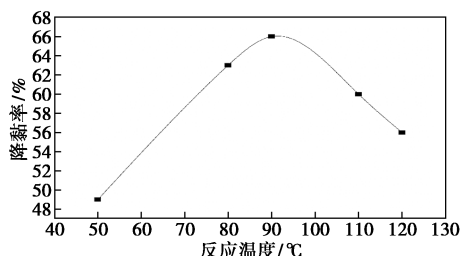


图 3 反应温度对降黏率的影响

由图 3 可知,随着反应温度上升,降黏率先上升后降低。当反应温度过低时,单体之间的碰撞几率降低,聚合反应难以进行,使得降黏率较低;而反应温度过高,则分子之间碰撞的可能性加大,也会提高反应终止的可能,从而影响降黏剂的降黏效果。最后确定最优反应温度为  $90^\circ\text{C}$ 。

### 2.1.4 反应时间的优化

反应时间的长短会影响降黏剂分子的聚合程度。由此,在单体配比  $n(\text{SMA}):n(\text{NVP}):n(\text{MA}):n(\text{TA})=6:2:3:3$ 、反应温度  $90^\circ\text{C}$ 、引发剂加量为单体质量的 0.65%、单体浓度 30% 的条件下,研究反应时间对稠油降黏率的影响,结果见图 4。

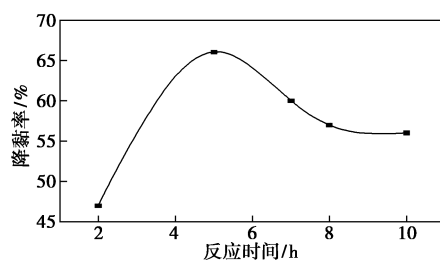


图 4 反应时间对降黏率的影响

由图 4 可以看出,随着反应时间的延长,降黏率呈现出先升高后又降低的趋势。这是由于反应时间过短时反应不充分,单体不能完成聚合;而过长的反应时间会使得聚合物的相对分子质量过大,从而影响降黏率。由此确定最佳反应时间为 5 h。

### 2.1.5 单体浓度的优化

单体浓度会影响溶液中单体分子的数量。因此,在单体配比  $n(\text{SMA}):n(\text{NVP}):n(\text{MA}):n(\text{TA})=6:2:3:3$ 、反应温度  $90^\circ\text{C}$ 、引发剂加量为单体质量的 0.65%、反应时间 5 h 的条件下,考察单体浓度与稠油降黏率的关系,结果见图 5。

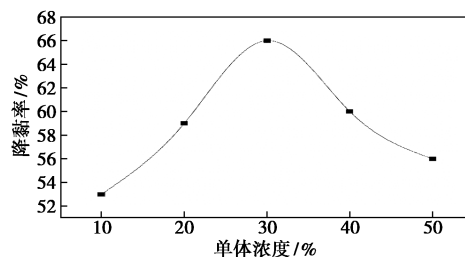


图 5 单体浓度对降黏率的影响

由图 5 可知,随着单体浓度的上升,降黏率先上升后下降。这是由于单体浓度较低时,溶液中单体之间碰撞的几率较低,使降黏剂分子不能很好地完成聚合反应;而单体浓度过高时会因为单体之间的碰撞过快而使聚合提前终止,因而降黏率较低。最后确定最优单体浓度为 30%。

## 2.2 降黏剂分子结构表征

将降黏剂分子纯化后进行红外光谱分析,如图 6 所示。由图 6 可知,  $1280\text{ cm}^{-1}$  为醚键的伸缩振动峰,  $1723\text{ cm}^{-1}$  为酯基和羧酸中  $\text{C}=\text{O}$  的伸缩振动

峰,  $1600\text{ cm}^{-1}$  为芳环的主要伸缩振动峰,  $1450\text{ cm}^{-1}$  为酮类的伸缩振动峰。以上吸收峰包括了 4 种单体的特征性官能团。 $3000\sim 3100\text{ cm}^{-1}$  没有出峰, 说明没有  $\text{—C=C—}$  的特征吸收峰。因此可以证明所合成油溶性稠油降黏剂与最初设计结构一致。

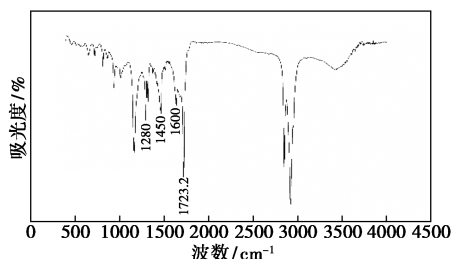


图 6 降黏剂的红外光谱图

## 2.3 降黏剂的性能评价

### 2.3.1 降黏剂加量对降黏率的影响

降黏剂用量的多少会直接影响降黏效果, 所以通过改变降黏剂的加量来分析降黏剂用量与降黏率之间的关系, 按 1.5 的实验方法探讨降黏剂加量对降黏率的影响, 结果见图 7。

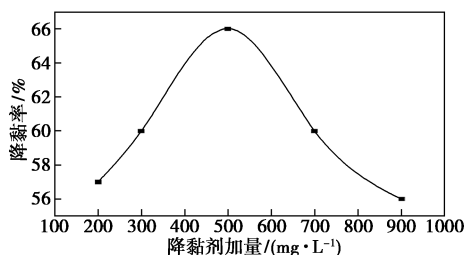


图 7 降黏剂加量对降黏率的影响

由图 7 可知, 随着降黏剂加量的增加, 降黏率先增加后降低, 当加量为  $500\text{ mg/L}$  时, 降黏效果最好, 降黏率可达 66%。这是由于降黏剂加量过低时会因为降黏剂分子过少, 不能有效拆散稠油中沥青质、胶质等的堆积结构; 而加量过大时会使得已经分散开的稠油分子之间再次通过氢键堆积起来, 影响降黏率, 同时该降黏剂属于高分子物质, 当加量太大时也可能由于自身黏度提升稠油的黏度。

### 2.3.2 降黏温度对降黏率的影响

由于温度会影响沥青质胶质等的氢键作用, 过高的温度会拆散稠油中堆积结构, 使稠油降黏, 并且会对氢键、 $\pi-\pi$  键, 以及稠油中的芳环堆积结构有较大影响, 由此需要找到降黏剂使用的适合温度, 按 1.5 的实验方法探讨降黏温度对降黏率的影响, 结果见图 8。

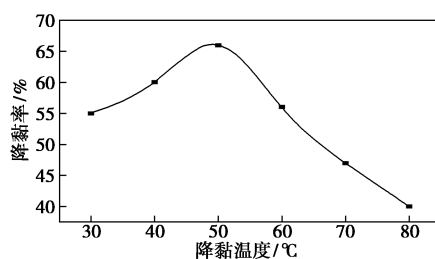


图 8 降黏温度对降黏率的影响

由图 8 可知, 随着降黏温度的升高, 稠油降黏剂的降黏效果先提升后降低, 当温度为  $50\text{ °C}$  时, 其降黏效果最佳。当降黏温度过低时稠油本身黏度过高, 降黏剂难以分散到稠油分子之间; 当降黏温度过高时, 稠油分子之间原有的氢键和堆积结构可能已经被高温破坏, 从而使得降黏效果不理想。

### 2.3.3 降黏剂普适性研究

由于油溶性稠油降黏剂的针对性较强, 对不同稠油的降黏效果相差很多, 实验探讨了合成降黏剂的普适性。根据稠油性质分为 1、2、3、4 号油, 测量方法为  $50\text{ °C}$  下恒温加热稠油 2 h 后测得初始黏度, 按 1.5 的实验方法测定加入降黏剂后  $50\text{ °C}$  下恒温加热 2 h 后稠油的黏度, 降黏效果见表 3。

表 3 降黏剂普适性评价

稠油类型	初始黏度/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	降黏后黏度/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	降黏率/ %
1	14600	6420	56
2	10300	5460	47
3	7900	4660	41
4	4000	2560	36

由表 3 可知, 该降黏剂对几种稠油均具有一定的降黏效果, 同时对于黏度高的油, 其降黏效果更明显, 说明该降黏剂具有一定的普适性。

## 2.4 降黏剂的机理研究

### 2.4.1 苯环电子云密度的影响

有学者应用密度泛函理论方法<sup>[14-17]</sup>, 并结合电子吸收光谱特征和电荷转移态性质进行研究, 证明在苯环中引入推电子基团可以提高分子的前线分子轨道能级, 改变前线分子轨道电子密度分布。根据文献<sup>[18-19]</sup>, 静电作用在  $\pi-\pi$  键中有重要作用, 芳环分子的极性大小在芳环堆积时起到了重要的作用, 推电子基团的引入可以影响芳环上电荷的分布, 增加芳环的极性, 当芳环正负极交错重叠时, 加大了正负极的互相吸引, 从而有利于新的  $\pi-\pi$  键形成。

由于茴香烯苯环上连接有醚键,而醚键为推电子基团,使苯环上的电子密度增加,更容易形成  $\pi-\pi$  键,从而可以提升降黏剂与稠油中芳环的作用效果,提升降黏剂的降黏效果。分别在不同配比下用茴香烯和苯乙烯合成不同的降黏剂,并评价其性能,结果见图 9。

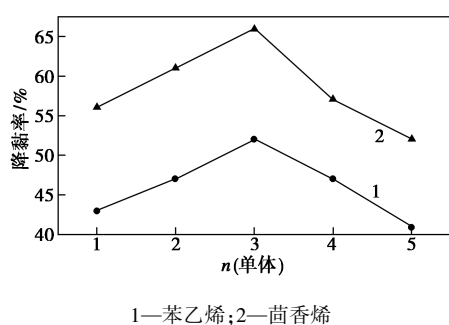


图 9 不同单体对降黏效果的影响

由图 9 可知,在只改变茴香烯和苯乙烯用量时,降黏剂的降黏效果不同,而茴香烯的效果均好于苯乙烯,这是由于茴香烯更容易形成  $\pi-\pi$  键,提升了降黏剂与稠油的相互作用效果,使其更容易分散稠油。

#### 2.4.2 降黏前后沥青质扫描电镜分析

取沥青质样品溶于甲苯后添加不同降黏剂,混合物超声 2 h 使其充分作用,再通过真空干燥去除其中的溶剂,最后用扫描电镜观察处理过后的沥青质与未处理沥青质的表面,结果见图 10。

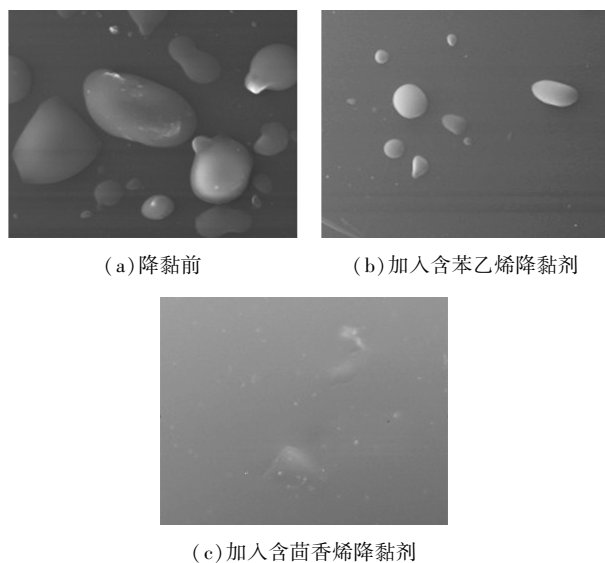


图 10 降黏前后沥青质扫描电镜图

由扫描电镜图(2 000 倍率)可知,在未加入降黏剂前,沥青质表面吸附较多颗粒,并且吸附的颗粒较大,呈现明显的聚集状态,这可能是导致稠油黏度

高的原因;在加入含苯乙烯降黏剂后,表面吸附颗粒变少,并且吸附颗粒的大小也明显变小;加入含茴香烯的降黏剂后,表面吸附颗粒明显减少,表面变光滑,使稠油原有的堆积结构被打散,说明含茴香烯的降黏剂可以更好地拆散稠油堆积结构,起到分散沥青质的作用。

#### 2.4.3 降黏前后胶质扫描电镜分析

取胶质样品溶于甲苯后添加不同降黏剂,混合物超声 2 h 使其充分作用,再通过真空干燥去除其中的溶剂。最后用扫描电镜观察处理过后的胶质与未处理胶质的表面,结果见图 11。

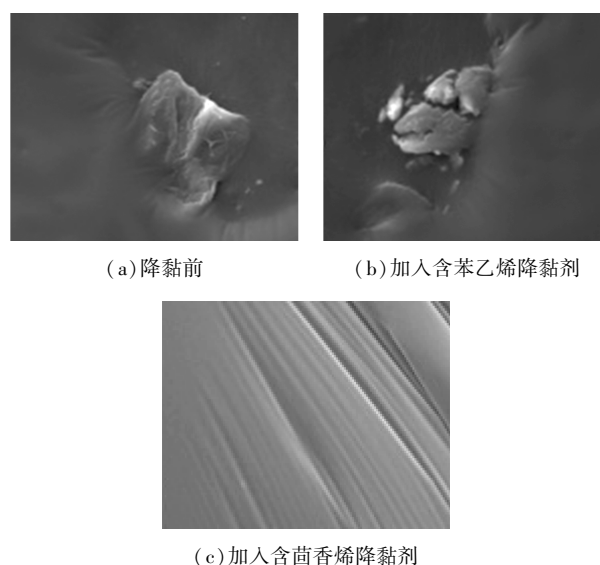


图 11 降黏前后胶质扫描电镜图

由扫描电镜图(2 000 倍率)可知,在未加入降黏剂前,可以观察到胶质表面存在较大吸附物,呈现聚集状态,且吸附物表面粗糙不平,这种结构可能会使稠油更易堆积,吸附更多的颗粒,增大稠油黏度;而加入含苯乙烯降黏剂后表面吸附物变得较为分散,并且吸附物明显变小,表面变得光滑;加入含茴香烯的降黏剂后,胶质表面吸附物大幅减少,吸附颗粒基本消失,并且表面变得更为光滑,说明含茴香烯的降黏剂可以更好地对胶质起分散作用,进而降低稠油黏度。

## 3 结论

(1)通过单因素分析,得到降黏剂的最优合成条件为: $n(\text{SMA}) : n(\text{NVP}) : n(\text{MA}) : n(\text{TA}) = 6 : 2 : 3 : 3$ ,反应温度  $90^\circ\text{C}$ ,引发剂加量 0.65%,反应时间 5 h,单体浓度 30%。

(2)通过红外光谱对降黏剂分子进行表征,证

明所合成油溶性稠油降黏剂与最初设计结构一致。

(3)降黏剂最佳评价温度为 50℃,最优加量为 500 mg/L,其降黏率可达 66%,同时具有较好的普适性。

(4)由于降黏剂  $\pi-\pi$  键的存在使其能很好地与稠油中的芳环作用,从而使降黏剂能很好地分散稠油中的胶质和沥青质,降低稠油的黏度。

### 参考文献

- [1] 李熠宇,吴琼,徐鹏,等.基于分子模拟的新型油溶性降黏剂的制备及性能优化[J].化工进展,2020,39(12):5234-5242.
- [2] 李建波,杨海燕,钟小芳.油溶性降黏剂 SWLY-1 的合成及评价[J].应用化工,2012,41(3):445-447,452.
- [3] 全红平,黄志宇,张太亮,等.一种新型油溶性稠油降黏剂的合成及评价[J].世界科技研究与发展,2012,34(1):43-44,61.
- [4] 邢浪漫.一种含有羟基型的油溶性稠油降黏剂研究[D].成都:西南石油大学,2019.
- [5] Chemodanov A E, Morozova E V, Aliev F A. Comparative geochemical characterization of heavy oil with various genesis[J]. Geomicrobiology Journal, 2021, 38(7): 1-6.
- [6] Miyake J, Miyatake K. Fluorine-free sulfonated aromatic polymers as proton exchange membranes [J]. Polymer Journal, 2017, 49(6): 487-495.
- [7] Zhao Y, Zhao D Y, Zhong R Q, et al. Research status and prospect of heavy oil recovery technology [J]. Key Engineering Materials, 2021, 888: 111-117.
- [8] 潘恬恬.氢键和芳环堆积构筑的过渡金属配合物超分子体系的结构研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [9] Fang S W, Wang M L, Xu Z P, et al. Preparation of an amphoteric flocculant having both high polymer content and low viscosity and its polymerization kinetics [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(1): 130-135.
- [10] 冯茹森,郭拥军,周薇,等.疏水缔合聚合物流变学测量方法研究 I:稳态剪切黏度[J].石油钻采工艺,2011,33(1):56-60.
- [11] 全红平,黄志宇,张太亮,等.油溶性枝型稠油降黏剂的合成与性能评价[J].油气地质与采收率,2012,19(1):69-71,115-116.
- [12] 陈宁宁,宋立新,郑云重,等.新型聚合油溶性稠油降黏剂的合成及性能研究[J].化学试剂,2017,39(2):134-136,140.
- [13] 赖南君,陈妹芳,祝仰文,等.部分支化预交联凝胶颗粒在多孔介质中的运移规律[J].精细石油化工,2021,38(3):28-34.
- [14] Shi B, Yu J, Tang T, et al. Study on UV spectrum and antioxidant properties of 3-tert-butyl-4-hydroxyanisole molecule [J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2021, 95(2): 343-348.
- [15] Hirata G, Takeuchi K, Shimoharai Y, et al. In-situ formation of tertiary carbon center in the formation of congested C—O ether bonds [J]. Angewandte Chemie, 2021, 133(8): 3870-3870.
- [16] 李春敏,阚玉和,徐莹莹,等.推/拉电子取代基对 PCBM 结构及光谱性质影响的理论研究[J].高等学校化学学报,2012,33(3):591-597.
- [17] 王艳艳,梁书恩,田春蓉,等.可降解聚氨酯泡沫塑料的制备及性能[J].化工新型材料,2011,39(11):57-59,79.
- [18] 苏建荣.氢键、芳环堆积构筑的多维超分子结构的合成与结构研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [19] 耿向飞,胡星琪,罗丽娟,等.新型季铵盐双子表面活性剂 12-PZ-12 的合成及性能研究[J].应用化工,2011,40(10):1771-1773,1778. ■
- [10] 柯回春,耿涛,姜亚洁,等.十二烷基三甲基胺/SDBS 复配体系的表面活性和应用性能研究[J].日用化学工业,2017,47(11):603-607.
- [11] 徐海丽,龙攀峰.烷基糖苷与其他类型表面活性剂的相互作用[J].山东大学学报(理学版),2017,52(1):9-14.
- [12] 张瑶,付美龙,侯宝峰,等.耐温抗盐型嵌段聚醚类阴-非两性离子表面活性剂的制备与性能评价[J].油田化学,2018,35(3):485-487.
- [13] 曹宏伟,张炜婕,郭洛伽,等.椰油酰胺丙基甜菜碱与脂肪醇聚氧乙烯醚羧酸钠复配性能研究[J].应用化工,2018,47(3):517-520.
- [14] 张瑞林,孙永强,郭建国.异构十醇聚氧乙烯醚与阴离子表面活性剂复配体系的性能研究[J].日用化学工业,2017,47(12):677-679. ■

(上接第 331 页)

其他表面活性剂复配时起泡性、稳泡性均较差;当体积比为 1:1 时,APG 与 AEO、APG 与 OP-10 复配体系在 6 和 8 h 时稳泡性高于单剂;当体积比为 1:1 时,SDS 与 AEO 复配体系从 2 h 开始至 8 h 的稳泡性一直高于单剂。

### 参考文献

- [1] 李刚森,蔡立芳,陈帅,等.AES 与 AEO<sub>9</sub> 复配体系表面活性的研究[J].精细与专用化学品,2016,24(6):20-22.
- [2] 刘晓臣,霍月青,白龙,等.不同离子头基对阴-非离子表面活性剂性能的影响[J].印染助剂,2018,35(5):39-41.
- [3] 赵瑞格,张卫红,马二倩,等.两个非离子表面活性剂复配体系的 NMR 研究[J].波普学杂志,2018,35(1):81-87.
- [4] 李刚森,蔡立芳,王培义,等.十二烷基硫酸钠与非离子表面活性