

油酸镍和油酸铁协同超声波 对原油降黏的研究

黄英超, 张智宏*, 魏雨, 杨留洋
(常州大学石油化工学院, 江苏常州 213164)

摘要:合成了两种油溶性催化剂油酸镍和油酸铁,研究了两者在常温常压下协同超声波对原油黏度的影响。在超声催化裂解实验中,油酸镍和油酸铁能够与超声波产生协同作用,使原油黏度分别降低了 39.11% 和 32.24%。采用 SARA、FT-IR 和元素分析等方法对处理前后沥青质和胶质的结构进行了探究,并揭示了其黏度降低的机理。结果表明,超声波具有改变分子结构的能力,大分子化合物通过超声振动裂解成小分子。油酸镍促进大分子化合物裂解,而在油酸铁的催化下,杂原子键更容易分解。

关键词:原油;超声波;油溶性催化剂;沥青质;胶质

中图分类号:TE624.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)09-0182-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.09.032

Research on nickel oleate and iron oleate cooperated with ultrasound for reducing crude oil viscosity

HUANG Ying-chao, ZHANG Zhi-hong*, WEI Yu, YANG Liu-yang
(School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract:Two oil-soluble catalysts, nickel oleate and iron oleate, are synthesized, and their synergistic effects with ultrasound on crude oil viscosity under normal temperature and pressure are studied. In the ultrasonic catalytic cracking experiments, nickel oleate and iron oleate can cooperate with ultrasound to effectively reduce the viscosity of crude oil by 39.11% and 32.24%, respectively. The structure of asphaltene and colloid in crude oil before and after treatment is characterized in detail by means of SARA, FT-IR and elemental analysis. Furthermore, the viscosity reduction mechanism is also revealed. Results indicate that ultrasound has the ability to change molecular structure, and large molecular compounds are more easily broken down into small molecules through ultrasound vibration. Nickel oleate promotes large molecular compounds to crack, while heteroatom bonds decompose more easily under the catalysis of iron oleate.

Key words: crude oil; ultrasound; oil-soluble catalyst; asphaltene; colloid

在原油运输过程中,降低原油的黏度对于降低成本和提高经济效益非常重要。通过有效断链和降黏,不仅能够提高原油的流动性,还对后续的焦化、催化裂化等炼制过程具有重要意义。传统降黏方法包括加热法^[1]、稀释法^[2]、乳化法^[3]等,但这些方法具有能耗高、成本效益比低等缺点,不能完全满足工业发展的需要。

目前,研究者们致力于开发新型降黏技术,如催化水热裂解法^[4]、超声波法^[5]、微生物降黏^[6]等。其中催化水热裂解法所用的催化剂能够促使原油内部分子结构改变,进而强化改质效果。Maity 等^[7]指出,用于原油降黏的催化剂可分为 4 种:水溶性催化剂、油溶性催化剂、两亲性催化剂和分散纳米催化剂。相比之下,油溶性催化剂能够充分接触油样,提

供更多的活性中心。由于油酸中的双键使其在室温下呈液态,在油相中分散性更好。过渡金属元素 Fe、Co、Ni、Cu 等可作为催化剂的活性中心^[8],其中 Fe、Ni 由于价格低廉且易得、环境友好被广泛关注。当过渡金属离子与合适的配体结合用作催化中心时,它们能够有效地促进水热分解反应的进行^[9-10]。陈尔跃等^[11]利用油酸制备油溶性油酸镍,在 200°C 反应 24 h 使重油黏度有效降低。Vakhin 等^[12]制备了油溶性铁基催化剂,探究其高温下对稠油的催化裂解效果,结果表明该催化剂可以降低高分子含量,稠油黏度明显降低。然而,这些研究依赖水热条件,反应条件较苛刻,增加了反应成本,限制了工业应用。此外,油溶性催化剂在水热裂解过程中仅在油相中较好地溶解,导致反应大部分发生在油/水界

收稿日期:2024-12-24;修回日期:2025-07-07

作者简介:黄英超(2000-),女,硕士生,研究方向为复杂混合物的分离分析,18015389693@163.com;张智宏(1966-),女,硕士,教授,研究方向为复杂混合物的分离分析,通讯联系人,czhangzh@163.com。

面^[13],影响了催化效率。单独使用油溶性催化剂无法达到大量回收稠油的生产要求。因此,有必要采用复合降黏技术使其优势互补,产生协同效应^[14-15],从而使降黏效果更好。

超声波降黏是一种物理降黏技术,利用超声波机械振动、空化和热作用产生的局部和瞬时的高温、高压等极端条件^[16]来降低黏度,提高流动性。超声波在油水两界面具有良好的传播特性,能显著提高催化效率^[17-18]。Shi等^[19]采用超声波静态混合器研究了大庆油田重油降黏情况,在超声功率1.8 kW、反应时间45 min、反应温度360℃,超声降黏效果最好。Ershov等^[20]对East Zhetybai和Ashchisai油田石油降黏的研究表明,超声波作用可以有效运用于降黏。在添加一定质量分数的甲苯和8.0~12.0 MPa压力下进行超声降黏处理,降黏率达35%。然而,上述研究都需要在高温高压下进行,因此有必要对温和条件下超声波降黏进行探究。

本文尝试制备油溶性催化剂,合成了两种具有相同配体(油酸)和不同催化离子(Fe^{3+} 和 Ni^{2+})的催化剂,并在常温常压下对塔河原油进行了超声降黏。比较了单独超声处理和油酸铁、油酸镍协同超声波对原油黏度造成的影响。采用SARA四组分分离(饱和烃、芳香族、胶质和沥青质)、FT-IR和元素分析方法,分析了超声前后沥青质和胶质的结构变化,揭示其降黏机理。

1 实验

1.1 材料准备和预处理

实验中使用的硅胶为100~200目,所有溶剂为分析纯,均由国药化学试剂有限公司提供。分析的油样来自塔河油田,其性质如表1所示。

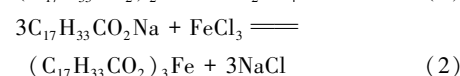
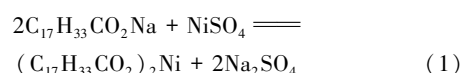
表1 塔河原油的特性

特性	数值
API°	17.1
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.9487
运动黏度(50℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	673.3
运动黏度(80℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	103.4
总酸值/(mg KOH·g ⁻¹)	0.21
蜡含量/%	3.4

取1 L原油放入蒸馏瓶中置于55℃油浴恒温12 h,室温避光静置1 d。预处理后的原油性质相对稳定。未经特别说明时,实验中提到的原油均为预处理后的原油。

1.2 催化剂的合成

采用液相反应法制备了油溶性催化剂。在室温下,称取摩尔比为1.5:1的油酸钠和硫酸镍分别溶解于去离子水中。将硫酸镍溶液缓慢加入油酸钠溶液中,搅拌混合,直至出现大量翠绿色絮状固体。过滤并洗涤,将沉淀物在50℃下真空干燥24 h,研磨成粉末,得到油酸镍催化剂。采用相同的方法,由氯化铁和油酸钠制备油酸铁催化剂。反应方程式如下:



1.3 超声降黏装置

将25 g油样和催化剂放入超声杯中,在常压下用JYD-150超声波对原油进行超声波处理。超声频率为20 kHz,超声功率为135 W,采用间歇处理,反应10 s和间歇5 s,循环运行60次。反应过程中,将装有油样的超声杯始终置于冷却水浴中,使超声宏观温度保持在室温,实验装置如图1所示。塔河的原油样品标记为“TA-0”,单独超声处理的样品标记为“TA-1”,油酸铁协同超声波处理的样品标记为“TA-2”,油酸镍协同超声波处理的样品标记为“TA-3”。

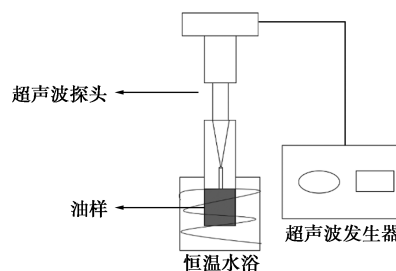


图1 原油超声降黏装置

1.4 实验方法

1.4.1 黏弹性和黏度测定

使用MCR-302旋转流变仪测量原油的黏弹性和动力黏度,每次测量重复3次以确保重现性。将样品加热至40℃并恒温5 min,使油的内部结构稳定。在振动频率为1 Hz、应变为0.5%、0.5℃/min降温速率的条件下,测量了3个流变参数储能模量(G')、损耗模量(G'')和损耗角(δ)随温度的变化情况。

将油样加热至50℃,在3 s⁻¹的剪切速率下每隔1 min测定一次黏度值,共测20次。得到的数据取15 min和20 min的平均值作为该油样的黏度。

1.4.2 四组分分离

将 1 g 油样与 30 mL 正庚烷混合,在 120℃ 下回流 30 min,过滤得到固体不溶性物质沥青质和可溶性物质用于硅胶柱层析分离。用不同的溶剂依次冲洗硅胶吸附柱,正己烷淋洗饱和烃,二氯甲烷淋洗芳香烃,甲苯/乙醇(1:1)淋洗胶质。旋蒸溶剂后得到各组分的含量。

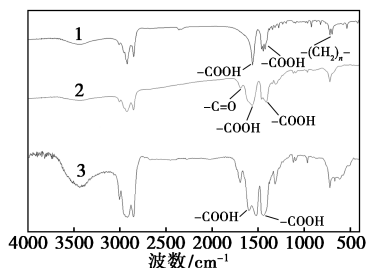
1.4.3 样品表征

使用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS50, Thermo Fisher)对催化剂和从油样中提取的沥青质和胶质进行红外光谱分析。光谱范围为 4 000 ~ 400 cm⁻¹。采用元素分析仪(Flash Smart, Thermo Fisher)测定处理前后从油样中分离出的沥青质和胶质的 C、H、N、S 含量。

2 结果和讨论

2.1 催化剂的表征

制得的油酸镍、油酸铁的红外光谱见图 2。与原材料油酸钠进行对比证实了油酸镍和油酸铁的成功制备。1 690 cm⁻¹的峰对应于油酸中 C=O 键的伸缩振动,722 cm⁻¹的峰值代表 n ≥ 4 的长链羧酸盐中 -(CH₂)_n- 的吸收峰。1 480~1 400 cm⁻¹和 1 650~1 500 cm⁻¹两个特征区域代表羧基的伸缩振动。计算这两个区域之间的频率差(Δ)可用于推断羧酸盐的配体类型^[21]。根据计算的 Δ 值,推断由具有螯合结构的油酸钠合成的油酸镍和油酸铁具有桥式结构。此外,由于原油呈黑色,无法清楚地观察到催化剂的溶解过程。将两种油溶性催化剂加入 C₁₀₋₁₃ 直链烃中并加热,发现催化剂完全溶解。这表明催化剂具有良好的油溶性,可以溶解在原油中。



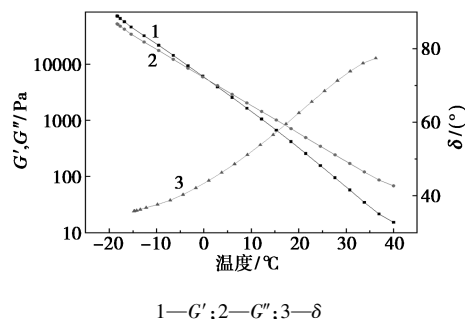
1—油酸钠;2—油酸镍;3—油酸铁

图 2 油酸钠、油酸镍和油酸铁的红外光谱图

2.2 原油黏弹性分析

图 3 为未处理油样在小幅度振荡剪切实验下的 G'、G'' 和 δ 曲线与温度的关系。当 δ 为 45° 时,对应的原油温度为胶凝点,表示原油开始形成凝胶结构。

原油的胶凝点约为 1℃,当温度达到 1℃ 以上时,原油中的蜡晶以极低浓度和高度分散的形式存在,原油弹性成分很小,可以认为是纯黏性流体。由于实验温度始终在 1℃ 以上,因此不需要考虑蜡的影响。

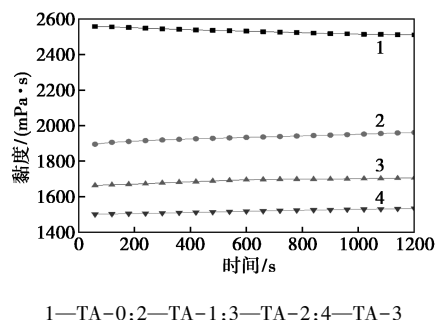


1—G';2—G'';3—δ

图 3 原油的黏弹性曲线

2.3 油样黏度分析

图 4 为不同油样在 20 min 内的黏度-时间曲线。



1—TA-0;2—TA-1;3—TA-2;4—TA-3

图 4 TA-0、TA-1、TA-2、TA-3 的黏度-时间曲线

从图 4 可以看出,单独超声处理后油样的黏度降低了 22.26%。加入催化剂协同超声波处理后,黏度降低显著,分别达到 32.24% (油酸铁) 和 39.11% (油酸镍)。这一结果表明,油溶性催化剂可以与超声波产生协同作用,增强降黏效果。超声处理后的油样黏度随时间的增加而略有上升,是因为超声波的空化作用破坏了油样的空间网络结构和部分分子结构,在剪切过程中,分散的颗粒开始流动并相互结合,形成新结构时部分饱和烃被包裹,表现出黏度随时间略有增加。

2.4 原油黏度恢复率

根据文献^[19-20]报道,黏度降低后是稳定的,超声空化对原油的黏度恢复有明显的抑制作用,不会恢复到原来的状态。为了研究油酸镍和油酸铁催化剂协同超声处理后塔河原油黏度的恢复情况,对处理后的原油黏度进行了 15 d 的测定,结果如图 5 所示。经过超声波和催化剂协同处理的原油在放置

一段时间后黏度略有上升,随后趋于稳定。15 d 后的黏度恢复率低于 5%,远低于处理前的黏度。表明超声波协同催化剂处理后原油组成发生永久性变化,导致不可逆的黏度降低。

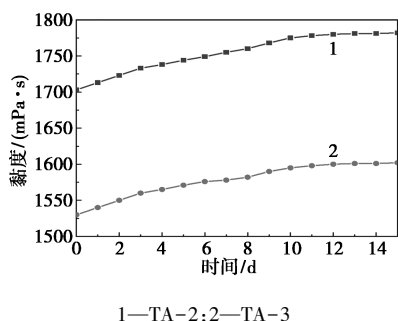


图5 超声波协同催化剂处理后原油黏度恢复曲线

2.5 油样中 SARA 组分的变化

表2列出了不同处理后油样 SARA 组分的变化情况。与原油(TA-0)相比,TA-1 中的沥青质含量降低,从 20.73%降低到 17.57%;芳香烃和饱和烃总含量从 70.77%增加到 73.10%。这说明在超声波的作用下,原油成分发生了变化,导致沥青质部分裂解转化为芳烃和饱和烃,从而使原油的黏度降低。胶质含量的增多可能是由于部分沥青质裂解产生了分子量相对较小的胶质。加入油酸铁和油酸镍处理后,沥青质分别降低了 15.77%和 26.05%。油溶性催化剂的加入使组分变化程度加深,表明其与超声波可以产生协同作用。油酸镍对大分子化合物降解效果更好,说明 Ni^{2+} 对塔河原油降黏的催化活性较 Fe^{3+} 强,可能是由于 Ni^{2+} 对沥青质的改变更大,对大分子环体系的解聚作用更强。SARA 组分的变化表明大分子化合物含量的降低直接导致了黏度的降低。因此,研究超声裂解反应前后胶质和沥青质的分子结构至关重要。

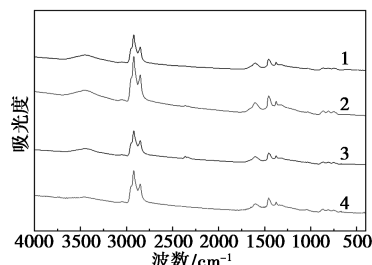
表2 处理前后油样 SARA 四组分的变化 %

组分	TA-0	TA-1	TA-2	TA-3
沥青质	20.73	17.57	17.46	15.33
胶质	8.50	9.33	8.86	9.77
芳香烃	19.92	21.05	21.79	18.81
饱和烃	50.85	52.05	51.89	56.09

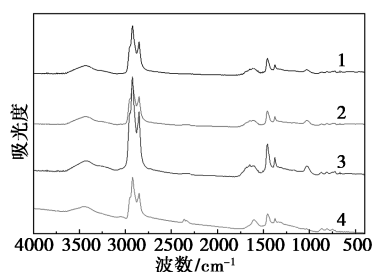
2.6 沥青质和胶质结构分析

如图6所示,沥青质和胶质在红外光谱中表现出4个主要特征区域。3 100~3 600 cm^{-1} 归因于氢键特征吸收峰的伸缩振动,2 800~3 100 cm^{-1} 归因于

碳氢键特征吸收峰的伸缩振动,1 000~1 800 cm^{-1} 范围内的吸收峰表明样品存在含氧官能团,600~900 cm^{-1} 归因于芳香族氢键特征吸收峰的伸缩振动。这些特征表明,胶质和沥青质主要由脂肪族和芳香族化合物组成。



(a) 沥青质



(b) 胶质

1—TA-0;2—TA-1;3—TA-2;4—TA-3

图6 油样中沥青质和胶质的红外光谱图

与沥青质相比,胶质具有更多的含氧官能团和氢键。与其他油样相比,TA-2 胶质中的氢键和脂肪族 H 峰更强,脂肪族化合物含量更高。胶质中含氧官能团的特征峰显著增强,这表明油酸铁可能会破坏 C—O 键结构。这也与 SARA 成分变化的结果一致。油酸铁更有可能破坏胶质分子,开环形成脂肪侧链,导致 TA-2 的整体峰值更大。

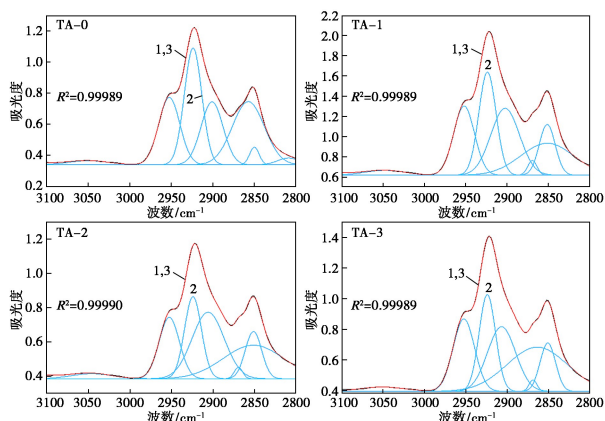
2.6.1 脂肪族烃类结构的变化

朱亚明等^[22]对沥青芳香族化合物提出的概念包括芳香氢指数(Iar)和支链化指数(CH_3/CH_2)。Iar 指数反映的是有机物的芳香缩合度, CH_3/CH_2 反映的是支链化程度。采用曲线拟合方法对 3 100~2 800 cm^{-1} 范围内沥青质和胶质的红外光谱进行处理,得到吸收峰在 3 050、2 950、2 920 cm^{-1} 处的积分面积。使用以下公式计算指数,其中 A 表示峰面积。

$$\text{Iar} = A_{3050} / (A_{3050} + A_{2920}) \quad (3)$$

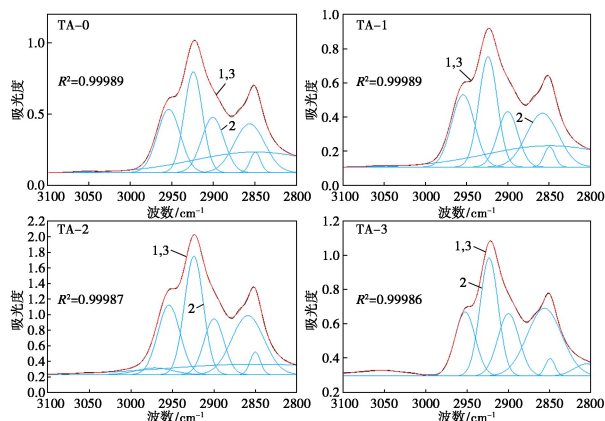
$$\text{CH}_3/\text{CH}_2 = A_{2950} / A_{2920} \quad (4)$$

Iar 和 CH_3/CH_2 的相应曲线拟合结果如图7所示。



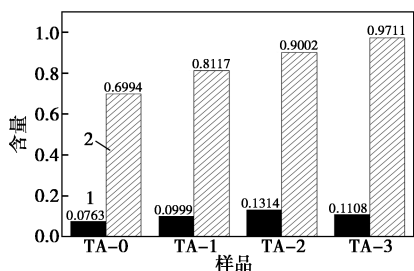
1—实验曲线;2—拟合峰值曲线;3—累积拟合峰值

(a) 沥青质红外光谱拟合

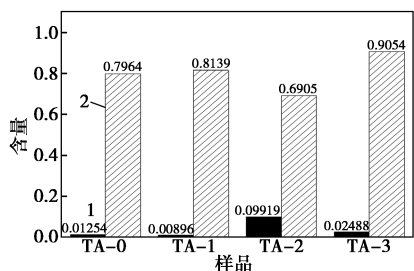


1—实验曲线;2—拟合峰值曲线;3—累积拟合峰值

(b) 胶质红外光谱拟合



1—Iar;2—CH₃/CH₂
(c) 沥青质 Iar 和 CH₃/CH₂

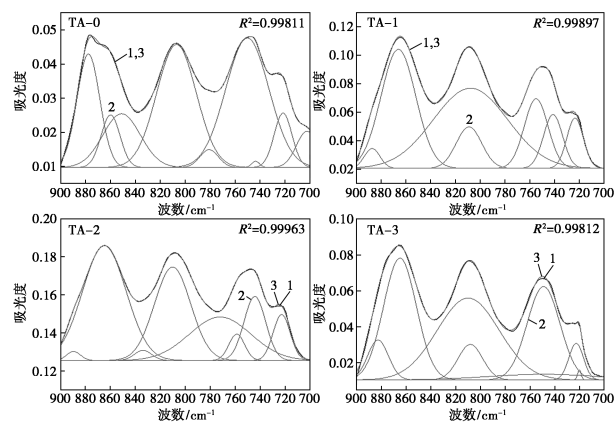


1—Iar;2—CH₃/CH₂
(d) 胶质 Iar 和 CH₃/CH₂

图 7(c)、(d) 显示了超声波处理后, 沥青质和胶质芳香氢指数 Iar 升高, 表明超声波可以改变分子结构, 使得沥青质和胶质芳环上的侧链断裂脱离。加入油酸镍后, 样品的 CH₃/CH₂ 指数最高, 沥青质和胶质的支链在超声波影响下断裂, 油溶性镍基催化剂促进了分子间长链断裂成短链, 支链化程度上升。因此, TA-3 具有较高的支化度。

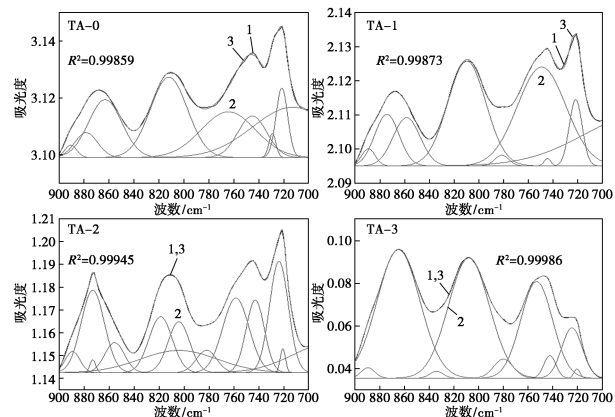
2.6.2 芳香族氢结构的变化

为了更准确地分析超声催化处理前后芳香氢的变化, 对每个样品在 700~900 cm⁻¹ 范围内的红外光谱进行分峰拟合处理, 结果见图 8。其中, 700~



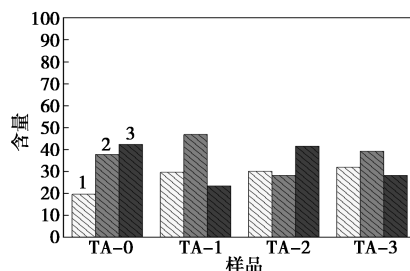
1—实验曲线;2—拟合峰值曲线;3—累积拟合峰值

(a) 沥青质红外光谱拟合



1—实验曲线;2—拟合峰值曲线;3—累积拟合峰值

(b) 胶质红外光谱拟合



1—1H;2—3H;3—4H
(c) 沥青质芳香氢含量

图 7 油样沥青质和胶质在 3 100~2 800 cm⁻¹ 的红外光谱拟合曲线及 Iar 和 CH₃/CH₂

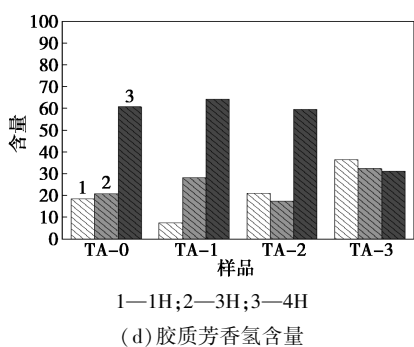


图8 油样沥青质和胶质在 $900\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 区域的及芳香氢含量分布

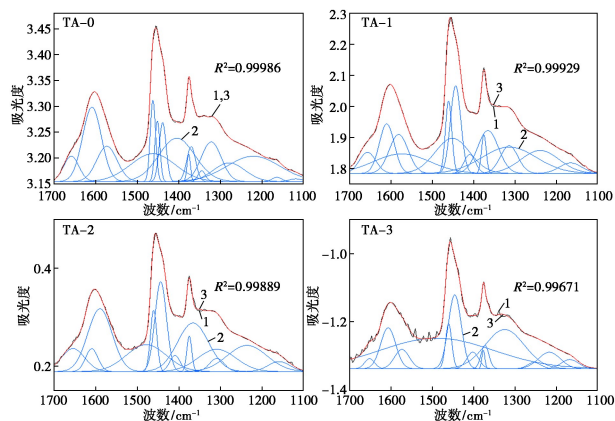
780 cm^{-1} 是芳环的邻位二取代(4H); $810\sim 850\text{ cm}^{-1}$ 是芳环的间位三取代(3H); $860\sim 900\text{ cm}^{-1}$ 是芳环的五取代(1H)^[23]。

图8(c)、(d)显示了沥青质和胶质中的芳香氢取代情况。从图中可以看出,经超声波和催化剂处理后,1H和3H的含量总体增加,而4H的含量减少。这表明芳环取代基变多,证明超声波可以使沥青质分子和胶质分子断裂,开环形成脂肪侧链,这与 CH_3/CH_2 变化情况相吻合。

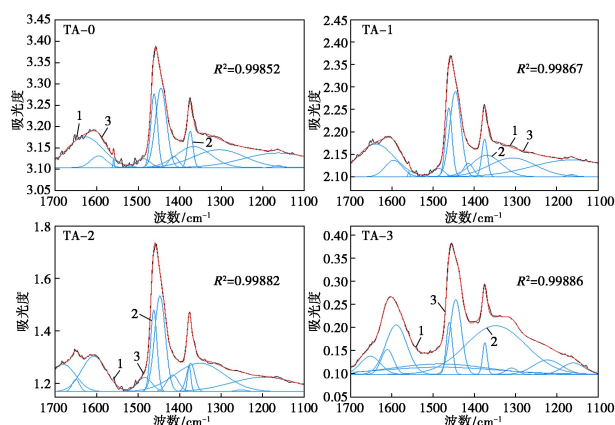
2.6.3 官能团的变化

为了研究油样的官能团变化,对每个样品在 $1700\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ 范围内的红外光谱分峰拟合,结果见图9。

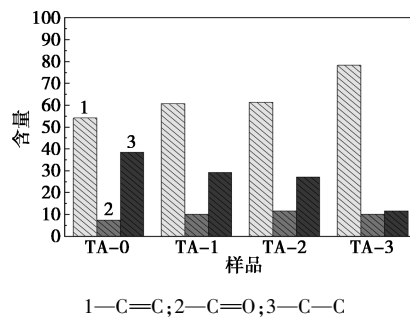
从图9可以看出,与沥青质中的官能团分布相比,胶质中含有较多的含氧基团。超声波协同催化剂处理后,沥青质和胶质中 $\text{C}=\text{C}$ 双键的含量增加, $\text{C}-\text{C}$ 的含量降低。沥青质和胶质分子中的稠环、脂环和侧链中的 $\text{C}-\text{C}$ 键分别比单独苯环、环烷烃和烷烃的 $\text{C}-\text{C}$ 键弱,并在超声波的作用下断裂^[24]。



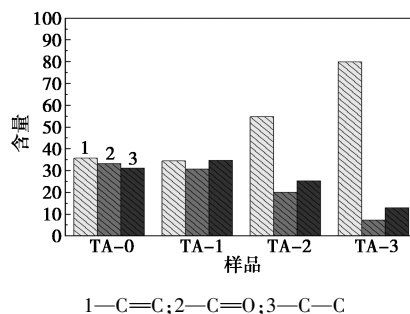
1—实验曲线;2—拟合峰值曲线;3—累积拟合峰值
(a) 沥青质红外光谱拟合



1—实验曲线;2—拟合峰值曲线;3—累积拟合峰值
(b) 胶质红外光谱拟合



1— $\text{C}=\text{C}$;2— $\text{C}=\text{O}$;3— $\text{C}-\text{C}$
(c) 沥青质官能团



1— $\text{C}=\text{C}$;2— $\text{C}=\text{O}$;3— $\text{C}-\text{C}$
(d) 胶质官能团

图9 油样沥青质胶质在 $1700\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ 红外光谱拟合曲线及基本官能团变化

2.6.4 胶质和沥青质的元素分析

表3是处理前后沥青质和胶质的元素分析结果。 $\text{C}-\text{S}$ 和 $\text{C}-\text{N}$ 键相对稳定,因此反应后大部分S和N保留在重组分子中,导致其含量增加。 N_c/N_h 的减少表明油样的大分子化合物在超声空化过程中会裂解成小分子化合物。经油酸镍处理后,油样中沥青质和胶质的 N_c/N_h 最小,说明油酸镍更能促进大分子化合物的裂解,这也与SARA变化一致。而在油酸铁作用下,胶质中S含量下降最多,说明其在一定程度上促进了杂原子键的分解。

表 3 胶质和沥青质的元素含量 %

样品	沥青质				胶质			
	TA-0	TA-1	TA-2	TA-3	TA-0	TA-1	TA-2	TA-3
C	83.91	83.17	81.69	82.10	81.52	82.26	81.67	81.97
H	9.55	11.55	11.18	11.68	11.73	13.01	11.54	13.03
N	0.199	0.394	0.369	0.388	0.182	0.366	0.375	0.378
S	4.09	4.21	4.14	4.21	3.87	3.59	3.40	3.58
N_C/N_H	0.73	0.61	0.61	0.59	0.58	0.53	0.59	0.52

3 结论

油酸铁和油酸镍催化剂具有良好的油溶性,能够协同超声波有效用于原油降黏。在 135 W、20 kHz 超声波条件下黏度降低了 22.26%;加入油酸镍和油酸铁后,可以增强降黏效果,降黏率分别为 39.11%和 32.24%。超声波可以改变分子结构,促进大分子化合物裂解成小分子,降低沥青质的含量,增加轻质组分的含量。油酸镍有利于大分子化合物的裂解,而在油酸铁的催化下更容易发生杂原子键的分解。通过发挥催化剂和超声波的协同作用能够有效降低原油黏度。

参考文献

- [1] Santos L A, Ribeiro D, Oldrich J, *et al.* Heavy oil transportation through steam heating: An analytical and numerical approach [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107932.
- [2] Sanchez N M, Klerk A. Viscosity mixing rules for bitumen at 1~10 wt% solvent dilution when only viscosity and density are known [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(7): 8227-8238.
- [3] Si Y, Zhu Y L. Synthesis of a novel borate ester anion-nonionic surfactant and its application in viscosity reduction and emulsification of heavy crude oil [J]. *Fuel*, 2023, 333(2): 126453.
- [4] Qu X, Li Y, Li S, *et al.* Thermal cracking, aquathermolysis, and their upgrading effects of Mackay River oil sand [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108473.
- [5] 孔德晶, 徐秋仿, 郭泽杰, 等. 基于超声波技术优选最佳原油降黏参数 [J]. *化学工程师*, 2017, 31(5): 43-45.
- [6] 张晓博, 洪帅, 姜晗, 等. 微生物对稠油降解、降黏作用研究进展 [J]. *当代化工*, 2016, 45(3): 617-621.
- [7] Maity S K, Ancheyta J, Marroquin G. Catalytic aquathermolysis used for viscosity reduction of heavy crude oils [J]. *Energy Fuels*, 2010, 24: 2809-2816.
- [8] Wu C, Yao C J, Sun K J, *et al.* Mechanism for reducing the viscosity of extra-heavy oil by aquathermolysis with an amphiphilic catalyst [J]. *Fuel Chem Technol*, 2010, 38: 684-690.
- [9] Li C, Huang W, Zhou C, *et al.* Advances on the transition-metal based catalysts for aquathermolysis upgrading of heavy crude oil [J]. *Fuel*, 2019, 257(12): 115779.1-115779.14.
- [10] Li J J, Wang X, Tang X D, *et al.* Effect of transition metal polymers with varying side alkyl chain on viscosity reduction of crude oil and aggregation behavior of asphaltene [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(12): 7771-7780.
- [11] 陈尔跃, 刘永建, 梁敏, 等. 油溶性油酸镍对辽河稠油的降黏作用 [J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(6): 68-71.
- [12] Vakhin A V, Sitnov S A, Mukhamatdinov I I, *et al.* Aquathermolysis of high-viscosity oil in the presence of an oil-soluble iron-based catalyst [J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2017, 53(5): 666-674.
- [13] Wang J, Liu L, Zhang L, *et al.* Aquathermolysis of heavy crude oil with amphiphilic nickel and iron catalysts [J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(12): 7440-7447.
- [14] Sun H, Zhang F. Research trends on reducing viscosity of viscous crude oils by chemical methods [J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2005, 13(23): 16-20.
- [15] 华强, 谭冬寒, 田世澄, 等. 稠油采出液超声波降黏实验研究 [J]. *科技通报*, 2018, 34(2): 28-31.
- [16] Luo X, Gong H, He Z, *et al.* Research on mechanism and characteristics of oil recovery from oily sludge in ultrasonic fields [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 399: 123137.
- [17] Avvaru B, Venkateswaran N, Uppara P, *et al.* Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry [J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2018, 42: 493-507.
- [18] Wang Z, Yin C. State-of-the-art on ultrasonic oil production technique for EOR in China [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 553-559.
- [19] Shi C, Yang W, Chen J, *et al.* Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 37(1): 648-653.
- [20] Ershov M A, Baranov D A, Mullakaev M S, *et al.* Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field [J]. *Chemical & Petroleum Engineering*, 2011, 47: 457-461.
- [21] Li X J, Hu K L, Huang Y L, *et al.* IR spectra of dicarboxylate of alkali-earth metal [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(3): 392-395.
- [22] 朱亚明, 赵雪飞, 高丽娟, 等. FT-IR 分峰拟合法定量分析精制煤沥青热转化过程的结构变化 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2076-2080.
- [23] He X, Liu X. FT-IR and Raman spectroscopy characterization of functional groups in various rank coals [J]. *Fuel*, 2017, 206: 555-563.
- [24] Wang D X, Zhao Y L, Pan Y Q, *et al.* Quantum chemical study on the structure of petroleum gums [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006, 34(6): 690-694. ■