

文章编号: 1001-6112(2010)06-0615-06

# 微波作用下稠油粘度变化及其化学因素探讨

汪双清<sup>1</sup>, 沈 斌<sup>1</sup>, 林壬子<sup>2</sup>

(1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 2. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

**摘要:**从重点分析研究稠油中的非烃化合物着手,对辽河、胜利、吐哈等 3 个油田的普通稠油在微波辐射作用前后的粘度和化学组成变化进行关联性研究。结果表明:微波作用导致了稠油中的一系列化学反应,改变了稠油的化学组成,使稠油的粘度降低或升高。稠油微波化学反应的主要方向是从较大分子碎裂为较小分子,并具有如下表现:1)微波作用优先使胶质和沥青质中的含杂原子化合物,尤其是含氧化合物分解;2)微波作用基本上不影响稠油中烃类化合物的分子组成,而非烃,尤其是含羟基的醇类和羧酸类化合物的分子分布模式发生显著变化;3)微波作用后稠油化学组成的改变是复杂微波化学反应的综合结果,因其原始化学组成而异,并决定了稠油粘度变化的方向和大小。

**关键词:**稠油;粘度;化学组成;微波化学

**中图分类号:**TE345

**文献标识码:**A

## VISCOSITY AND CHEMICAL COMPOSITION CHANGES OF HEAVY OILS AFTER MICROWAVE PROCESSING

Wang Shuangqing<sup>1</sup>, Shen Bin<sup>1</sup>, Lin Renzi<sup>2</sup>

(1. *National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China*; 2. *Department of Natural Resource and Environmental Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

**Abstract:** Based on intensive analyses of heterocomponents in heavy oils from the Liaohe, Shengli and Tuha Oilfields of China, a primary research on correlation between viscosity and chemical composition changes of original and microwave treated heavy oils was conducted. The results shew that the chemical composition of heavy oils was altered by a series of reactions under microwave processing, and the viscosity changed bidirectionally. The main microwave chemical reactions of heavy oils were cleavages of larger molecules into smaller ones, and were illustrated as follows: a) heterocomponents, especially oxygenated ones were decomposed prior to hydrocarbons by microwave radiation; b) the molecular distribution pattern of aliphatic and aromatic hydrocarbons remained unaltered under microwave processing, while that of heterocomponents was altered significantly, especially for alcohols and carboxylic acids; c) the chemical composition of heavy oils after microwave radiation was a comprehensive result of complex microwave chemical reactions varing in correlation to its original chemical nature, and was decisive for the direction and level of viscosity changes.

**Key words:** heavy oils; viscosity; chemical composition; microwave chemistry

作为一种正在探索中的稠油开采技术,微波采油是通过电磁波向储层释放物理能量、从内部和表面同时进行“体加热”的热法采油工艺过程,具有速度快、能量损失少、可达到的温度高等优点。在我国,微波采油的研究工作从“八五”期间就已开始,已取得一些很有价值的成果<sup>[1]</sup>。作为一种快速、有效的加热方式,微波已经被广泛应用于化学化工<sup>[2-6]</sup>、环保<sup>[7-9]</sup>、石油加工与处理<sup>[10-12]</sup>等领域,发现了许多无法用传统理论来解释的微波化学现

象,因此人们猜测可能存在某种微波非热效应在影响着化学反应的过程<sup>[13]</sup>。一般认为,稠油是准塑性流型的流体,在微波作用下会发生非热效应化学裂解反应,使其流变性得到不可逆的改善。但是,笔者在实验研究中注意到,微波作用并非总是使稠油的粘度降低,有时也使粘度升高。那么,是什么因素控制着微波作用对稠油粘度改变的方向和程度?如何选择最佳的微波频段和辐射时间以实现稠油的高效、低能耗开采?对于这些基础性问题,

收稿日期:2010-03-02;修订日期:2010-10-08。

作者简介:汪双清(1961—),男,博士,研究员,从事有机地球化学研究。E-mail: herr007@163.com。

基金项目:中国地质调查项目(1212350816015)和中国石油大学重质油国家重点实验室开放课题基金共同资助。

迄今未见研究报道。鉴于微波作用优先激化有机分子中的极性化学键,因而对稠油中非烃的化学组成影响最大,且非烃是决定稠油的粘度及其开采效果的关键性化学组分,笔者从重点分析研究稠油中的非烃化合物着手,对辽河、胜利和吐哈 3 个油田的普通稠油受微波幅射前后的粘度变化与化学组成改变进行了关联性研究,以期对研究微波作用下稠油粘度变化的化学机理及相关科技问题起到抛砖引玉的作用。

## 1 样品及实验方法

样品为 3 个普通稠油,分别采自辽河、胜利和吐哈油田。各称取 50 g,分别置于 250 mL 烧杯中,在拌有 150 mL 水的大气环境下,用自制微波化学实验炉在 3 kW,2 450 MHz 处理 60 s。原始样品及经微波处理后样品各化学族组分的分离制备及化学组成的分析测试参照文献[14—18]方法进行。饱和烃、芳烃、非烃、沥青质的质量分数用棒状薄层色谱法测定<sup>[14]</sup>。油样用正己烷沉淀出沥青质后,用 MKW-MPLC-15A-50 型中压液相色谱仪(德国 Margot Köhnen-Willsch Chromatographie & Software 公司产品)制备饱和烃、芳烃、非烃等 3 个化学组分<sup>[15]</sup>;非烃组分用固-液柱色谱法分离为酸性非烃、极性较小的中性非烃 I 和极性较大的中性非烃 II 等 3 个非烃子组分<sup>[16]</sup>后,继续用甲醇洗脱出柱上残留物质,并在非烃组分总质量分数的基础上,用质量归一化法计算各非烃子组分在稠油中的质量分数。饱和烃、芳烃组分直接用 GC 2010 气相色谱仪和 GC-MS-QP2010Plus 气相色谱-质谱仪(日本岛津公司产品)分析<sup>[17-18]</sup>,酸性非烃、中性非烃 I、中性非烃 II 分别经衍生化处理后进行 GC 和 GC/MS 分析<sup>[16]</sup>,用内标法定量。沥青质的 IR 分析用液膜法进行。粘度测定用 HAAKE Viscotester VT500 流变仪(德国 HAAKE 公司产品)的 PK100D 测量系统,在 50 °C,101 kPa 下以平板-锥板法测定,取 15 次测定的平均值。

## 2 微波作用对稠油化学组成的改变

### 2.1 稠油化学族组成变化

微波处理前后 3 个稠油中饱和烃、芳烃、非烃和沥青质 4 个传统族组分含量的变化见表 1。各稠油的族组分构成均明显地为微波作用所改变,沥青质含量减少,非烃含量升高;除胜利稠油饱和烃含量升高外,辽河稠油和吐哈稠油的饱和烃及芳烃含量均降低。这表明,微波作用导致了沥青质的碎裂,很可

能主要生成分子量相对较小的非烃化合物。

在非烃组分内部,各稠油中酸性非烃、中性非烃和高极性的柱残留物的含量差异显著。微波作用前后各非烃子组分含量变化显著,且变化情况因样品而异(表 2)。对辽河和吐哈稠油来说,微波处理后柱残留物显著增加,中性非烃明显减少;而胜利稠油是中性非烃增加,柱残留物减少,增、减的幅度相对较小。酸性非烃含量在 3 个稠油中都略有升高。非烃组成的基本格局并未改变,即中性非烃是主要成分,酸性非烃次之,柱残留物最少。但是,胜利、辽河和吐哈稠油酸性非烃与中性非烃的质量比值分别是 0.14,0.21 和 0.46,经微波作用后分别为 0.14,0.26 和 0.55,趋向于升高。

### 2.2 稠油分子大小变化

表 3 是微波处理前后稠油各主要组分中气相色谱可检测物,即可气化的较低分子量组分含量的

表 1 微波作用前后稠油饱和烃、芳烃、非烃和沥青质组分的含量变化

Table 1 Contents of aliphatics, aromatics, resin and asphaltene of original and microwave treated heavy oils

稠油产地	组分	质量分数/%		
		微波处理前	微波处理后	变化幅度
辽河油田	饱和烃	37.2	36.1	-3.0%
	芳烃	16.6	16.4	-1.2%
	非烃	32.9	36.0	9.4%
	沥青质	13.3	11.5	-13.5%
胜利油田	饱和烃	26.3	27.5	4.6%
	芳烃	16.5	15.3	-7.3%
	非烃	46.4	47.9	3.2%
	沥青质	10.7	9.4	-12.1%
吐哈油田	饱和烃	39.9	38.5	-3.5%
	芳烃	13.8	12.8	-7.2%
	非烃	40.7	44.6	9.6%
	沥青质	5.5	4.1	-25.5%

注:数据均系 5 次测定的平均值。

表 2 微波作用前后各非烃子组分在稠油中含量的变化

Table 2 Contents of subfractions separated from resin of original and microwave treated heavy oils

稠油产地	组分	质量分数/%		
		微波处理前	微波处理后	变化幅度
辽河油田	酸性组分	5.1	5.4	5.9%
	中性组分 <sup>1)</sup>	24.3	21.1	-13.2%
	柱残留物	3.5	9.5	171.4%
胜利油田	酸性组分	4.9	5.4	10.2%
	中性组分 <sup>1)</sup>	35.9	38.2	6.4%
	柱残留物	5.7	4.4	-22.8%
吐哈油田	酸性组分	11.9	12.7	6.7%
	中性组分 <sup>1)</sup>	25.9	23.0	-11.2%
	柱残留物	2.9	8.9	206.9%

注:全部数据系 3 次测定的平均值。

1) 数据系中性非烃 I 和中性非烃 II 之和。

表3 微波作用前后稠油的部分族组分中GC可气化成分的含量

Table 3 Contents of GC amenable components in aliphatic, aromatic hydrocarbons and acidic and neutral heterofractions of original and microwave treated heavy oils

稠油产地	组分	GC可气化成分的质量分数/%					
		组分中			全油中		
		微波处理前	微波处理后	变化幅度	微波处理前	微波处理后	变化幅度
辽河油田	酸性非烃	27.8	31.1	11.9%	1.4	1.7	21.4%
	中性非烃	13.6	12.7	-6.6%	3.3	2.7	-18.2%
	饱和烃	23.1	22.9	-0.9%	8.6	8.3	-3.5%
	芳烃	43.3	52.4	21.0%	7.2	8.6	19.4%
胜利油田	酸性非烃	19.2	13.9	-27.6%	0.9	0.8	-11.1%
	中性非烃	14.4	7.1	-50.7%	5.2	2.7	-48.1%
	饱和烃	48.1	28.4	-41.0%	12.7	7.8	-38.6%
	芳烃	53.8	66.6	23.8%	8.9	10.2	14.6%
吐哈油田	酸性非烃	8.4	9.6	14.3%	1.0	1.2	20.0%
	中性非烃	5.0	6.5	30.0%	1.3	1.5	15.4%
	饱和烃	48.2	29.8	-38.2%	19.2	11.5	-40.1%
	芳烃	47.9	55.0	14.8%	6.6	7.0	6.1%

注:含量以角鲨烷为内标化合物按GC峰面积计算,系3次测定的平均值。酸性组分经甲酯化处理后测定;中性非烃经三甲基硅烷化处理后测定,数据系中性非烃I和中性非烃II之和。

变化情况。不同的样品有着显然不同的结果。虽然3个样品中总非烃组分含量都是增加的(表1),并且辽河和吐哈稠油中的低分子量酸性非烃的质量分数分别从1.4%,1.0%增至1.7%,1.2%,胜利稠油中的低分子量酸性非烃化合物却减少,质量分数从0.9%降至0.8%。同样,中性非烃中低分子量化合物的含量在辽河和胜利稠油中是降低的,而在吐哈稠油中却升高。这种非烃内部组成变化的不确定性说明,稠油在微波作用下的化学反应是复杂的、多方向的,一方面沥青质裂解为较小的非烃分子,另一方面也可能有非烃化合物向烃类化合物转化,两种化学反应的速率在不同稠油样品中有显著差异。与另外2个稠油不同,胜利稠油的饱和烃含量增加(表1),说明它有较多的饱和烃生成。这一点可以从3个稠油中游离醇和游离脂肪酸含量变化的显著差异来得到进一步的解释(见后续讨论)。

### 2.3 稠油微波化学规律

综合表2和表1信息可以看出,微波作用导致了酸性物质的生成,其合理来源是沥青质的碎裂。中性非烃组分在辽河和吐哈稠油中的减少说明,中性非烃可以向其他类型化合物转化。但是,胜利稠油的中性非烃组分是增加的,可能是因为中性非烃化合物在微波作用下不仅可以转化为其他类型的化合物,同时也可以从其他组分得到补充。同样,柱残留物含量在辽河和吐哈稠油中显著升高,意味着较大量的生成。然而,胜利稠油中柱残留物含量是减少的,说明它也可以转化为其他组分。笔者注意到,辽河稠油和吐哈稠油中沥青质含量降低的幅

度不能平衡其柱残留物含量上升的幅度。所以,生成柱残留物的先质至少不全是沥青质。质谱分析结果表明,柱残留物不同于沥青质,其分子量并不大,小于1200 amu的组分占80%以上。那么,新生柱残留物的另一个合理来源就是中性非烃。但是,即使是沥青质和中性非烃的含量降低值之和,也不能抵消柱残留物的含量升高值。如何解释这一现象呢?从表1可以看到,这种差额要从饱和烃和芳烃含量的降低来找回。烃类化合物,尤其是饱和烃不可能在本文的微波处理条件下转化为非烃,其含量的降低只可能是挥发散失。可见,有一定幅度的组分含量变化应归因于微波处理及其后续过程中轻组分的散失,这一点可以从微波作用后饱和烃中气相色谱可检测物份额的显著减少得到证实(表3)。

考察游离醇化合物在微波作用前后的含量变化情况发现,尽管胜利稠油的中性非烃组分含量是增加的(表2),其游离醇化合物的含量却显著下降(表4)。同样,吐哈稠油的醇含量亦明显下降。这表明微波作用过程中的确发生了醇化合物的分解。

从酸性化合物含量的变化可以得出相同的结论。虽然微波作用后所有稠油样品酸性非烃组分的含量都是增加的(表2),游离脂肪酸含量在胜利稠油中从每克油样967.3 μg显著降至516.3 μg,而在辽河稠油和吐哈稠油中则分别从128.0,1239.7 μg升至236.6,1416.7 μg(表4)。据此可以推断,微波作用不仅可以导致高分子非烃化合物降解为小分子的羧酸,同时也能使羧酸转化为其他化学成分,最大的可能性是转化为饱和烃。

表 4 微波作用前后稠油中游离脂肪酸和游离醇化合物含量的变化

Table 4 Contents of free carboxylic acids and alcohols in original and microwave treated heavy oils

稠油产地	组分	GC 可检测成分的质量分数/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )		
		微波处理前	微波处理后	变化幅度
辽河油田	游离脂肪酸	128.0	236.6	84.8%
	游离醇	0.0	0.0	0.0%
胜利油田	游离脂肪酸	967.3	516.3	-46.6%
	游离醇	177.2	41.3	-76.7%
吐哈油田	游离脂肪酸	1239.7	1416.7	14.3%
	游离醇	38.2	34.8	-8.9%

注:含量以角鲨烷为内标化合物按 GC 峰面积计算,系 3 次测定的平均值。游离脂肪酸经甲酯化处理后测定,游离醇经三甲基硅烷化处理后测定。

此外,芳烃组分含量在 3 个稠油中都是略微降低的(表 1),其气相色谱可检测成分却普遍升高(表 3)。前者可能有微波作用过程中物质散失的原因,而后者可能主要是芳烃组分内部分子碎裂的结果(见后续讨论)。

至此可以清楚地看出,微波作用导致了稠油中杂原子化合物和芳烃化合物组分的系列化学反应。其主要反应方向是从大分子碎裂为小分子,既可以从低极性非烃分子裂解出高极性非烃分子,也可以从非烃或芳烃分子生成烃类化合物。

### 3 对稠油分子分布模式的影响

#### 3.1 烃类化合物

气相色谱和气相色谱—质谱分析结果表明,微波作用对于饱和烃的分子分布模式影响甚微。可能是因为微波(2 450 MHz)的作用对象是极高性的化学结构单元,对于低极性的烃类化合物的影响甚微<sup>[19]</sup>,而这里微波作用的时间短和热效应低也可能不足以导致饱和烃化学键的断裂或立体结构的异构化。另一方面,由非烃转化而来的烃类化合物由于量少,亦不足以影响到烃类化合物的原有分布模式。

在前面的讨论中我们已经注意到,微波作用在各稠油中均导致了显著量小分子芳烃的生成(表 3)。但是,在 GC 和 GC-MS 分析中没有观察到芳烃分子分布模式的明显变化。一个重要原因可能是小分子芳烃的组成的确没有发生明显改变。但是,微波作用虽然不能导致芳环体系的破坏,却很可能大幅度提高了大分子芳烃的内能,从而导致与芳环连接的侧链 C-C 键断裂,使小分子芳烃组分增加。由于这一反应发生在芳烃组分内部,与在地质过程中的热裂解过程类似,所以对小分子芳烃分布模式的影响不明显。气相色谱—质谱分析结

果表明,3 个稠油的芳烃主要由直链的侧链同系物组成,支持这种推测。

#### 3.2 非烃化合物

稠油中各非烃组分的基本化学构成及其 GC 和 GC-MS 特征可以参见文献[16,20-21]。与烃类化合物不同,GC 和 GC-MS 分析结果表明,微波作用导致了非烃分子分布模式的显著变化,酸性化合物和中性化合物的分子组成均发生了明显变化(图 1)。这是因为,稠油中的非烃化合物主要是含氧化合物,而极高性的 C-O 键极易为微波所极化,造成 C-O 键的断裂。这正是微波采油技术所依据的基本条件,也是稠油微波化学反应发生的前提。

### 4 对稠油粘度影响的原理探讨

笔者通过对稠油化学组成与粘度关系的研究,取得了一套通过稠油化学组成计算其粘度的经验公式<sup>[22]</sup>,即稠油的粘度( $\eta$ )按下式计算:

$$\eta = 5\ 344.4e^{0.169\ 7I_v} + c \quad (1)$$

$$I_v = w_s + 0.95w_1 + 0.26w_g + 0.14w_z - 0.42w_b - 0.48w_f \quad (2)$$

式中: $w_s, w_1, w_g, w_z, w_b, w_f$  分别为稠油中酸性非烃、沥青质、高极性非烃(柱残留物)、中性非烃、饱和烃、芳烃组分的质量分数,%。在实际应用中,有时会出现与具体稠油的化学性质有关的常数性误差,即需要在式(1)中增加一项常数  $c$ 。

表 5 给出了受微波作用前后 3 个稠油粘度的实测值和计算值。从表中数据可见,微波作用改变了稠油的粘度,但对不同地区稠油粘度的影响程度

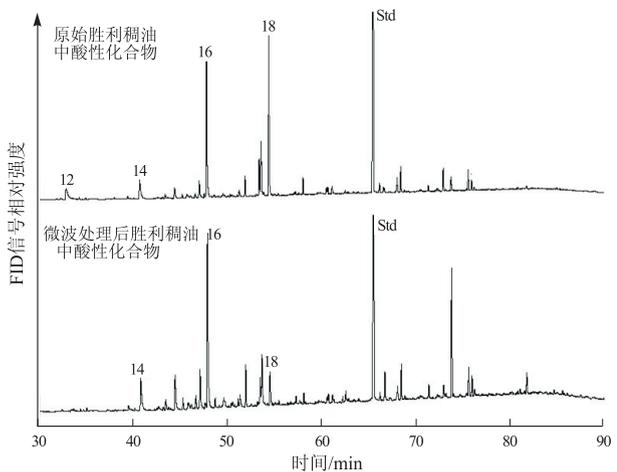


图 1 胜利油田稠油微波作用前后酸性非烃甲酯化产物的 GC 图  
12~18. 正构脂肪酸的碳数;Std. 内标化合物

Fig. 1 Comparison of gas chromatograms of methylesterified carboxylic acids in original and microwave treated heavy oils from Shengli Oilfield

表5 微波处理前后稠油粘度的实测值和计算值

Table 5 Calculated and measured viscosity values of original and microwave treated heavy oils

稠油		粘度(50℃)/(mPa·s)	
		实测值 <sup>1)</sup>	计算值 <sup>2)</sup>
辽河稠油	处理前	7 591	4 112+c <sub>1</sub>
	处理后	6 948	4 297+c <sub>1</sub>
	变化幅度	-8.5%	4.5% <sup>3)</sup>
胜利稠油	处理前	6 765	8 318+c <sub>2</sub>
	处理后	5 153	7 413+c <sub>2</sub>
	变化幅度	-23.8%	-10.9% <sup>3)</sup>
吐哈稠油	处理前	5 938	3 887+c <sub>3</sub>
	处理后	6 276	5 179+c <sub>3</sub>
	变化幅度	5.7%	33.3% <sup>3)</sup>

1)系12次测定的平均值;

2)c<sub>1</sub>,c<sub>2</sub>和c<sub>3</sub>为与样品化学性质有关的常数;3)系视c<sub>1</sub>,c<sub>2</sub>和c<sub>3</sub>为0时的变化幅度。

差异显著,且不是单向的。辽河稠油和胜利稠油的粘度降低,而吐哈稠油的粘度则上升。这说明,稠油原有的化学性质对微波作用的效果有着决定性作用。这提示我们,从改善稠油的固有粘度考虑,不宜简单地采用一种微波处理条件来实现对所有稠油的降粘。

从表5还可以看到,微波处理前后稠油粘度的计算值和实测值的变化方向基本一致,即胜利稠油粘度降低,吐哈稠油粘度升高。例外的是,辽河稠油粘度的实测结果降低,而计算值略微升高。这可能与该稠油化学组成的测定误差有关,也可能是计算公式的误差所致。比较各稠油实测值和计算值的变化幅度不难发现,经验公式(1)有对微波处理后稠油给出相对较高的粘度值的迹象。由此可见,稠油粘度的变化确系微波化学反应导致其化学组成变化的结果。

稠油沥青质的红外光谱特征在微波作用前后发生了显著变化(图2)。吐哈稠油与辽河稠油及胜利稠油沥青质红外光谱图的区别在于1 250~500 cm<sup>-1</sup>范围的吸收峰带的显著差异。吐哈稠油沥青质在1 000~1 250 cm<sup>-1</sup>有很强的宽吸收频带,并在600~650 cm<sup>-1</sup>有很强的双吸收峰带。前者对应与C—O键(很可能主要是酯)的各种振动有关的吸收带,而后者很可能是与芳环上C—H的面外变形振动有关的吸收峰<sup>[23]</sup>。相对于—CH<sub>3</sub>和—CH<sub>2</sub>—的吸收带(3 000~2 800和1 500~1 350 cm<sup>-1</sup>)的强度来说,辽河和胜利稠油的沥青质在1 250~500 cm<sup>-1</sup>范围吸收峰带的强度很低,而受微波作用之后显著增强;吐哈稠油的情况正好相反。可见,吐哈稠油受微波作用后粘度升高可能是因为它的沥青质是富氧芳香型的(羧酸和芳环结构成分丰富),而辽河

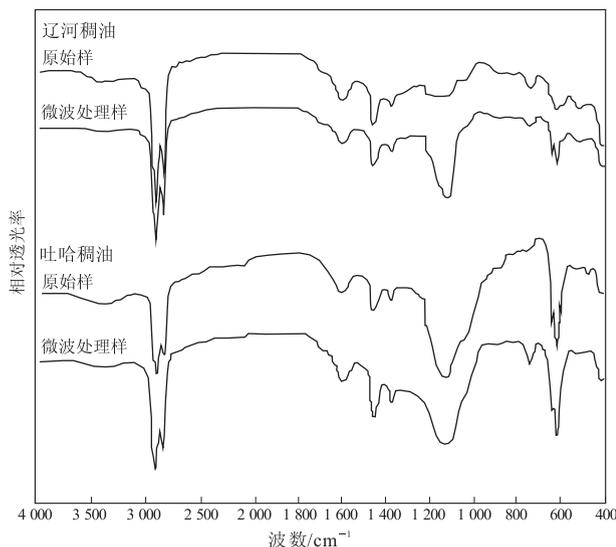


图2 微波作用前后稠油沥青质的红外光谱图对比

Fig. 2 Comparison of IR spectra of asphaltene isolated from original and microwave treated heavy oils

和胜利稠油的沥青质则是相对贫氧的脂肪族型的。表2和表4分别显示吐哈稠油中酸性非烃和游离脂肪酸的浓度均显著高于辽河稠油和胜利稠油,支持这种解释。这两种类型稠油的沥青质在受微波作用后,由3 200~3 600 cm<sup>-1</sup>峰带显示的羧基的丰度都明显降低,证实的确有羧酸结构单元由沥青质中碎裂下来。但是,辽河稠油和胜利稠油的贫氧脂肪型沥青质中脂肪型组分丰度高,受微波作用后C—O结构单元的丰度显著升高,表明发生了脂肪型组分的优先断裂,同时芳香结构和C—O结构成分得到相对富集;而吐哈稠油中富氧芳香型沥青质因为芳香结构和C—O结构成分的原始丰度高,脂肪型组分的丰度低,C—O键断裂主要是产生酸性化合物,并释放出芳香结构单元,致使沥青质中C—O结构单元和芳香结构单元的丰度降低,而稠油中游离脂肪酸显著增加(表4)。由于酸性非烃对稠油粘度的贡献力度比其他所有组分都大<sup>[22]</sup>,其含量的增加正是导致吐哈稠油粘度升高的最主要原因。

## 5 结论

微波辐射可以使稠油的粘度降低,也可以使其升高,乃因稠油中的一系列微波化学反应改变了稠油的化学组成。

稠油微波化学反应的主要方向是从较大分子碎裂为较小分子。杂原子化合物易发生微波化学反应,导致各非烃组分含量的明显变化和分子级分布模式的改变,主要是从分子量较高的非烃分子裂

解出分子量较小的高极性非烃分子,并从非烃生成烃类化合物;微波作用也可能会导致大分子芳烃发生侧链断裂,但对小分子烃类(饱和烃、芳烃)化合物的分子分布模式没有明显影响。

微波作用对稠油粘度影响的幅度和方向取决于稠油本身的化学性质。因此,微波采油法的技术条件及其应用应该有选择性。

参考文献:

[1] 程亮,杨林,邹长军. 稠油物理场降粘技术研究进展[J]. 化工时刊, 2005,19(6):51-55.  
 [2] 许家喜. 微波与有机化学反应的选择性[J]. 化学进展, 2007,19(5):700-712.  
 [3] 周崇文,曾春亮. 浅谈微波在有机合成化学中的应用[J]. 化学工程与装备,2009(3):91-92.  
 [4] 王龙龙,王尚玲.  $\beta$ -甲萘醌合成研究进展及绿色化学法制备展望[J]. 化工生产与技术, 2009,16(3):38-41.  
 [5] 张怡莎,周欣,陈华国,等. 不同方法提取的蓝布正挥发油的化学成分研究[J]. 药物分析杂志, 2008,28(2):263-266.  
 [6] 王飞生,胡赛阳,叶荣飞. 不同方法提取香根油化学成分的GC/MS分析[J]. 中国调味品, 2009,34(7):42-45.  
 [7] 徐文倩,郑广宏,黄钟霆. 微波技术在水污染治理中的应用[J]. 江苏环境科技, 2006,19(1):26-30.  
 [8] 林立文,常亮. 国内外污泥预处理技术及研究现状[J]. 水利水电快报,2009,30(7):13-14,30.  
 [9] 李晨曦,李惠民,邓兵杰. 微波诱导催化技术在污染治理中的应用[J]. 四川化工, 2007,10(1):38-40,49.  
 [10] 杨永珍,刘旭光,郭明聪,等. 重油残渣基新型碳功能材料的研究进展[J]. 材料导报,2009,23(6):59-64.  
 [11] 陈梅荣,唐晓东. 原油脱盐脱水技术研究进展[J]. 精细石

油化工进展,2008,9(5):49-53.  
 [12] 谭丽,沈明欢,王振宇,等. 原油脱盐脱水技术综述[J]. 炼油技术与工程,2009,39(5):1-7.  
 [13] 王禹,孙海涛,王宝辉,等. 微波的热效应与非热效应[J]. 辽宁化工,2006,35(3):167-169.  
 [14] 国家发展与改革委员会. SY/T 5119-2008 岩石中可溶有机物及原油族组分分析[S]. 中华人民共和国石油天然气行业标准,2008.  
 [15] RADKE M, WILLSCH H, WELTE D H. Preparative hydrocarbon group type determination by automated medium pressure liquid chromatography[J]. Anal Chem, 1980, 52 (3):406-411.  
 [16] 汪双清,王陪荣. 沉积物和原油中常见含氧化合物的分离分析[J]. 分析化学, 2001,29(3):276-279.  
 [17] 国家发展与改革委员会. SY/T 5779-2008 石油和沉积有机质烃类气相色谱分析方法[S]. 中华人民共和国石油天然气行业标准,2008.  
 [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18606-2001 气相色谱-质谱法测定沉积物和原油中生物标志物[S]. 中华人民共和国国家标准,2001.  
 [19] MICHAEL D, MINGOS P, BANGHURST D R. Applications of microwave dielectric heating effects to synthetic problems in chemistry[J]. Chem Soc Rev, 1991(20): 1-47.  
 [20] 汪双清,林壬子,梅博文. 辽河稠油中非烃化合物类型的初步研究[J]. 石油学报, 2001,22(1):36-40.  
 [21] 汪双清,沈斌,林壬子. 辽河超稠油的化学组成特征及其致粘因素探讨[J]. 石油学报(石油加工), 2010, 26(6): 894-900.  
 [22] 汪双清,沈斌,林壬子. 稠油黏度与化学组成的关系[J]. 石油学报(石油加工), 2010,26(5):795-799.  
 [23] 陈耀祖. 有机分析[M]. 北京:高等教育出版社, 1981: 582-624.

(编辑 韩 或)

(上接第 614 页)

[21] 傅家谟,秦匡宗. 干酪根地球化学[M]. 广州:广东科技出版社,1995.  
 [22] 程克明,王铁冠,钟宁宁. 烃源岩地球化学[M]. 北京:科学出版社,1996:203-233.  
 [23] HUANG W L. Experimental study of vitrinite maturation: effects of temperature, time, pressure, water and hydrogen

index [J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(2):233-241.  
 [24] SCHENK H J, DIECKMAN N V. Prediction of petroleum formation: the influence of laboratory heating rates on kinetic parameters and geological extrapolations [J]. Marine and Petroleum Geology,2004,21(1):79-95.

(编辑 黄 娟)