

# 芳烃化合物在稠油火驱室内实验中的指示作用

闫红星<sup>1,2</sup>, 杨俊印<sup>1,2</sup>, 姜文瑞<sup>1,2</sup>, 张艳芳<sup>1,2</sup>, 李培新<sup>1,2</sup>

1. 中国石油 辽河油田分公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010;

2. 国家能源稠(重)油开采研发中心, 辽宁 盘锦 124010

**摘要:**火驱是否实现高温氧化是评价稠油油藏火驱开发效果的技术难点之一,为了认清火驱开发过程中原油化学性质的变化规律,采用室内三维物理模型开展了稠油火驱实验,并对火驱高温氧化后的原油开展芳烃气相色谱-质谱方面的研究。火驱后原油中萘系列、菲系列以及稠环芳烃相对含量增加,三芳甾烷相对含量降低;火驱过程中萘系列化合物与非系列化合物均容易发生脱甲基、甲基迁移以及甲基取代反应,并且 $\beta$ 构型萘与非化合物的热稳定性要明显好于 $\alpha$ 构型;由于4-甲基二苯并噻吩与1-甲基二苯并噻吩热稳定性的差异,可以用其相对含量的变化和谱图分布特征判断火驱是否高温氧化;稠环芳烃中蒽可以作为火驱高温氧化的标志物,蒽/苯并[e]芘、荧蒽/芘、蒽/菲比值的变化也是指示火驱高温氧化的良好指标。原油中芳烃化合物的变化特征与特征性标志物可以作为火驱过程中指示燃烧状态的良好指标,为稠油火驱燃烧状态的判识提供支持。

**关键词:**稠油;火驱;燃烧状态;高温氧化;色谱-质谱;芳烃

**中图分类号:**TE357.7

**文献标识码:**A

## Function of aromatic compounds as indicators in laboratory experiments of heavy oil with fire flooding

YAN Hongxing<sup>1,2</sup>, YANG Junyin<sup>1,2</sup>, JIANG Wenrui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yanfang<sup>1,2</sup>, LI Peixin<sup>1,2</sup>

1. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China;

2. National Energy Heavy Oil R&D Center, Panjin, Liaoning 124010, China

**Abstract:** Identifying whether high-temperature oxidation is realized in fire flooding has become one of the technical difficulties in evaluating the effect of fire flooding for heavy oil reservoirs. In order to study how the chemical properties of crude oil varied during fire flooding, a series of heavy oil fire flooding laboratory experiments were carried out using a three-dimensional physical model, and the gas chromatography-mass spectrometry of aromatics were performed for the crude oil before and after high-temperature oxidation during fire flooding. Results show that after fire flooding, the relative contents of naphthalenes, phenanthrenes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the crude oil sample increased, while the relative content of tri-aromatic steroids decreased. During fire flooding, naphthalenes and phenanthrenes were all prone to demethylation, methyl migration and methyl substitution, showing significantly higher thermal stabilities in  $\beta$ -naphthalenes and  $\beta$ -phenanthrenes relative to  $\alpha$ -naphthalenes and  $\alpha$ -phenanthrenes. Due to the difference in thermal stability between 4-methyldibenzothiophene and 1-methyldibenzothiophene, the high-temperature oxidation in fire flooding could be identified according to the changes in their relative contents and the distribution characteristics of their spectra. Anthracene in polycyclic aromatic hydrocarbons could be used as a marker of high-temperature oxidation in fire flooding, while the changes in perylene/benzo(e) pyrene, fluoranthene/pyrene and anthracene/phenanthrene ratios were also good indicators for high-temperature oxidation in fire flooding. As observed from these findings, it can thus be concluded that the variation characteristics and characteristic markers of aromatic compounds in crude oil are good indicators for combustion state during fire flooding, providing favorable support for the identification of combustion state in heavy oil fire flooding.

**Key words:** heavy oil; fire flooding; burning status; high temperature oxidation; GC-MS; aromatic hydrocarbons

火驱作为一种稠油开发的重要方式,具有适用范围广、运行成本低、采收率高等优点<sup>[1-7]</sup>,目前正在罗马尼亚、加拿大、美国、印度、中国等国家进行了工业化应用与试验。火驱的基本原理是通过注

气井将空气注入地下稠油藏,然后利用点火器引燃地下油藏原油,原油中的大分子重质组分会发生裂解反应生成轻质组分同时释放出大量热量,在高温环境下与燃烧生成的气体共同作用驱动原油至生产井采出<sup>[8-9]</sup>,一般认为火线前缘温度维持在400℃以上便发生了高温氧化<sup>[10-11]</sup>,火驱是否实现高温氧化已经成为评价火驱开发的技术难点之一。

目前有关稠油火驱燃烧状态方面的研究较多,包括数值模拟、微地震、生产动态、气体组分、储层矿物变化以及示踪剂等方法<sup>[12-14]</sup>。刘其成等<sup>[15]</sup>采用室内物理模拟的方法分析了火驱的火线形成与拓展特征;梁金中等<sup>[16]</sup>采用物理模拟试验研究了火驱燃烧前缘的展布规律。何继平等<sup>[17]</sup>提出火驱产出气的组分含量能直接反映火驱燃烧程度;程宏杰等<sup>[10]</sup>研究新疆油田火驱试验区指出,气体指标中氧气利用率保持在93%,视氢碳原子比为1.37,证明油藏实现火驱高温燃烧;杨智等<sup>[18]</sup>则是研究新疆油田红浅1井区直井的族组分、热解及岩矿转化分析,认识了各区带高温氧化特征。在火驱前后原油的色谱变化特征方面,虽然杨俊印等<sup>[19-21]</sup>采用气相色谱技术分析了火驱室内实验与开发现场原油的变化特征,指出原油受高温裂解作用的影响,存在主峰碳前移、轻重比增加、轻质组分含量上升等特征,但是原油作为火驱过程中的直接载体,对火驱前后原油的微观变化特征的分析仍不够深入,目前缺少结合质谱技术分析火驱前后原油变化规律方面的研究。

由于芳烃化合物中的苯环具有独特的热稳定性,一般不易发生苯环的键裂反应,而苯环不同位置侧链烷基的热稳定性又有所差异,因此本文期望借助气相色谱—质谱分析技术对原油中芳烃化合物开展研究,进而发现高温氧化后原油的微观变化特征,达到判识火驱燃烧状态的目的,对火驱开发方式的进一步推广与关键参数的调控提供积极的指导意义。

## 1 室内实验

### 1.1 实验方案及条件

为了获取火驱高温氧化下的原油,采用三维模型(120 cm×40 cm×30 cm)开展物理模拟实验,该物理模型由模型本体、注气系统、油气分离系统以及控制系统共4部分组成,为了观察火驱过程中温度场的发育特征,模型本体中布置355支测温点与13个测压点进行实时监测,间距分布为8 cm×6 cm×6 cm。

模型填充用的原油取自S1-38-330井,原油脱气黏度23 168.1 mPa·s(50℃),将原油与石英砂按一定比例混合配制含油饱和度为60%的模拟油砂,并采取布置一层测温点装填一层油砂的方式装填,最终共装填油砂287.6 kg。燃烧从点火器端开始,向生产井(出口端)推进,直至燃烧结束,其中经历了燃烧预热—燃烧腔培育—火线推进等阶段。实时温度场图显示模型点火成功,火腔温度维持在500℃以上,远远高于火驱高温氧化的温度下限(400℃),并实现了火线前缘的平稳推进(图1),火线稳步推进过程中产出的原油经油气分离系统收集后开展芳烃的气相色谱—质谱分析。

### 1.2 样品分析

原油样品采用柱层析法进行族组分的分离,首先取一定量原油样品用30 mL正己烷沉淀沥青质,之后采用层析柱(2 g氧化铝+3 g硅胶)进行分离,依次用30 mL正己烷、20 mL二氯甲烷和正己烷的混合溶液(体积比2:1),10 mL无水乙醇和10 mL三氯甲烷淋洗,分别得到饱和烃、芳烃和非烃组分<sup>[22]</sup>。分离得到的芳烃组采用英国广谱公司生产的QUATTRO II型气相色谱—质谱仪进行分析。色谱分析条件为进样器温度305℃,升温程序为先50℃恒温2 min,然后以3.5℃/min的升温速率升至220℃,再以2.5℃/min的升温速率升至305℃并保持15 min,溶剂延迟时间为9 min,载气为99.999%的氦气;质谱分析条件为质谱接口温度250℃,离子源采用电子轰击(EI)模式,扫描模式采用选择离子,设置的特征离子包括萘系列化合物 $m/z$  128, 142, 156, 170, 184, 198, 菲系列化合物 $m/z$  178, 192, 206, 220, 234, 萤蒽、芘、芘系列化

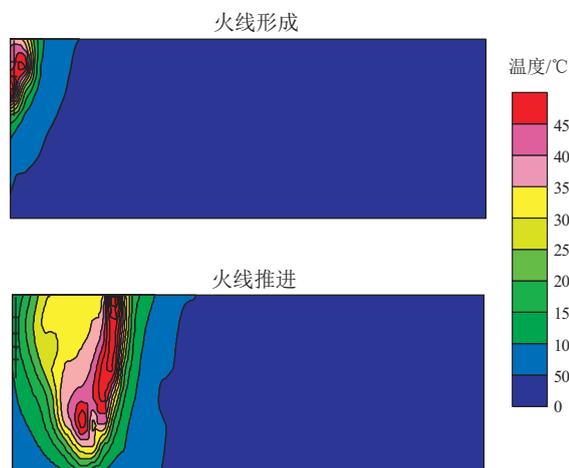


图1 火驱三维实验不同阶段温度场

Fig.1 Temperature field during different stages of 3D experiment with fire flooding

合物  $m/z$  202, 216, 228, 252, 联苯、二苯并呋喃系列化合物  $m/z$  154, 168, 182, 芴系列化合物  $m/z$  166, 180, 芳烃化合物的定性分析依据国标《气相色谱—质谱法测定沉积物和原油中生物标志物:GB/T18606-2017》, 定量分析和相关的参数依据不同化合物在质量色谱图上的峰面积计算得来。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 原油物性与族组分特征

原油物理性质是反映原油品质最直接的指标, 表 1 给出了原油在经历火驱高温氧化前后的黏度及族组分含量的变化特征, 可以看出经过火驱高温氧化后原油品质变好, 黏度明显降低, 原油族组分中饱和烃、芳烃含量增加明显, 饱和烃由火烧前的 14.57% 增加至 25.45%, 芳烃由 12.97% 增加到 17.51%; 非烃和沥青质相对含量均不同程度降低, 其中以非烃相对含量降低明显, 这与前人的认识基本一致<sup>[23]</sup>。分析认为原油在火驱高温氧化过程中油藏温度在 500 °C 以上, 非烃、沥青质中带有 O、S、N 等元素的杂原子大分子化合物在高温作用下容易发生裂解反应, 生成分子量相对较小的饱

和烃、芳烃等烃类化合物。

### 2.2 芳烃整体特征

原油沉积环境与成熟度不同, 其芳烃总离子流图的特征也不同。在芳烃总离子图上一般存在 4 个系列的峰群: (1) 以萘和烷基萘为代表的二环芳烃化合物峰群; (2) 以菲和烷基菲为代表的三环芳烃化合物峰群; (3) 以茛、蒽、芘、荧蒽等为代表的稠环芳烃; (4) 以芳香甾烷为代表的四环、五环等多环芳烃化合物峰群。一般在未成熟—低成熟的原油中芳烃总离子流图呈后峰型或双峰型分布, 以多环芳烃占优势, 萘系列、菲系列化合物含量较少, 随着热演化程度的增加, 在高成熟的原油中芳烃总离子流图呈前峰型分布, 低分子量的萘系列、菲系列化合物占优势<sup>[24-25]</sup>。从图 2 中可以看出, 原油在火驱前以大分子量的三芳甾烷占优势, 经历火驱后三芳甾烷含量明显降低, 低分子量的萘系列与菲系列化合物含量明显增加, 火驱前萘系列与菲系列化合物含量分别为 18.11% 和 33.06%, 火驱后分别增加至 20.84% 和 53.19%, 增加幅度较大。另外, 稠环芳烃含量则由火驱前的 8.95% 增加至火驱后的 15.91% (表 2)。分析原因认为, 原油中的芳

表 1 火驱前后原油物性与族组分变化特征

Table 1 Physical parameters and group composition of crude oil before and after fire flooding

| 原油类型 | 50 °C 黏度/<br>(mPa · s) | 族组分/% |       |       |       |
|------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
|      |                        | 饱和烃   | 芳烃    | 非烃    | 沥青质   |
| 火驱前  | 23 168.1               | 14.57 | 12.94 | 39.30 | 33.19 |
| 火驱后  | 503.1                  | 25.45 | 17.51 | 27.07 | 29.97 |

表 2 原油火驱前后芳烃化合物相对含量对比

Table 2 Relative content of aromatic compounds in crude oil before and after fire flooding

| 原油类型 | 相对含量/% |       |        |       |
|------|--------|-------|--------|-------|
|      | 萘系列    | 菲系列   | 三芳甾烷系列 | 稠环芳烃  |
| 火驱前  | 18.11  | 33.06 | 22.17  | 8.95  |
| 火驱后  | 20.84  | 53.19 | 10.07  | 15.91 |

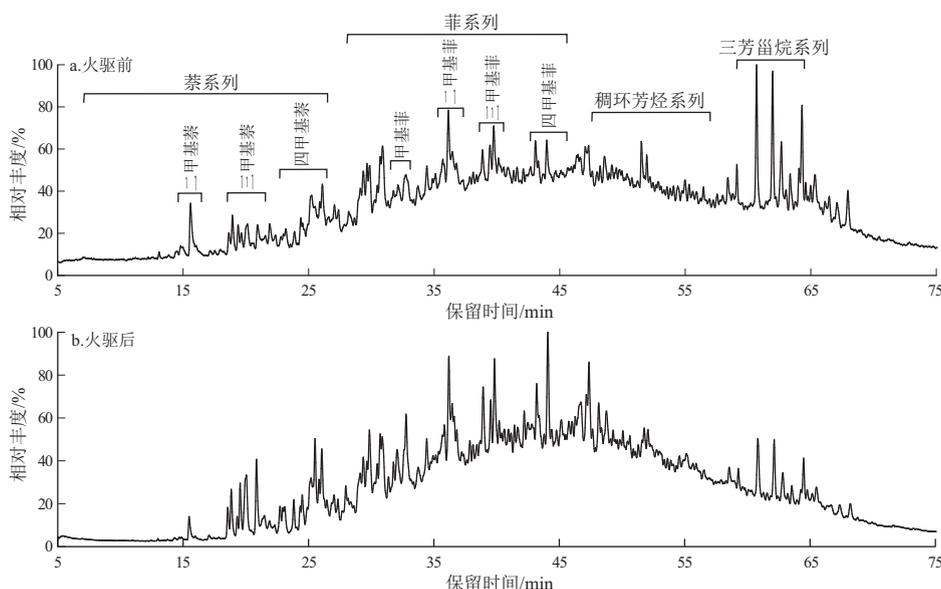


图 2 原油火驱前后芳烃总离子流图

Fig.2 Total aromatic ion flow of crude oil before and after fire flooding

烃化合物在火驱高温作用下发生了明显的歧化反应,一方面大分子芳烃化合物在高温作用下发生裂解反应生成小分子的化合物,另一方面芳烃化合物之间发生缩合反应,生成结构更稳定的稠环芳烃化合物。

### 2.3 萘系列

原油中萘系列化合物衍生于倍半萘至三萘类化合物,一般认为在成熟度较低的原油中含有丰富的甲基萘(MN)、二甲基萘(DMN)、三甲基萘(TMN)、四甲基萘(TeMN)甚至5个甲基的萘系列<sup>[26-28]</sup>。

该原油火驱前后的样品中均检测到萘系列化合物,包括萘、甲基萘、二甲基萘、三甲基萘和四甲基萘,其中以三甲基萘和四甲基萘的含量占优势,萘和甲基萘含量极低,这可能是由于双环芳烃特别容易挥发,在分离和测试过程中可能会存在损失,因此,在应用萘和甲基萘的相关参数时需要谨慎。萘系列化合物在原样中的整体分布规律为 TMN>TeMN>DMN>N>NM, 经历火驱后萘系列化合物的分布规律为 TMN>TeMN>DMN>NM>N, 这表明萘系列化合物相对含量在火驱前后已经发生了变化。

甲基萘的异构体包括2种,分别为 $\alpha$ 构型的1-甲基萘和 $\beta$ 构型的2-甲基萘,原油火驱前后两种甲基萘之间的含量变化也有规律性(表3),2-甲基萘与1-甲基萘的比值在原样中为0.72,经历火驱后该比值为0.83。造成该现象的原因与芳烃的“电子效应”密切相关<sup>[26]</sup>,萘是由两个苯环稠合而成,但不同碳位碳—碳键的键长并不相同,不同碳位的电子云密度并不是平均化的,中间共用的两个碳原子的电子云密度最低, $\beta$ 位碳原子稍高, $\alpha$ 位

表3 原油火驱前后萘系列化合物对比  
Table 3 Relative content of naphthalene series compounds in crude oil before and after fire flooding

| 原油类型 | 相对含量/% |      |       |       |       | 2-MN/<br>1-MN |
|------|--------|------|-------|-------|-------|---------------|
|      | 萘      | 甲基萘  | 二甲基萘  | 三甲基萘  | 四甲基萘  |               |
| 火驱前  | 1.70   | 1.37 | 16.03 | 44.22 | 36.68 | 0.72          |
| 火驱后  | 0.45   | 0.38 | 5.10  | 56.02 | 38.05 | 0.83          |

碳原子最高,电子云密度高的碳原子更易发生取代反应,因此,萘的甲基取代反应更容易发生在 $\alpha$ 碳原子上。需要注意,由于“空间效应”的影响, $\beta$ -甲基萘(2-甲基萘)的空间位阻小于 $\alpha$ -甲基萘(1-甲基萘),即 $\beta$ -甲基萘的稳定性好于 $\alpha$ -甲基萘。因此,造成火驱后2-甲基萘与1-甲基萘比值的增加。

多甲基萘在火驱前后的变化规律也可以用基本的化学原理解释。一般来说,在苯环的对位和邻位电子云密度较大,因而更容易发生对位或邻位的取代反应,同时受空间效应的影响,取代反应更容易在离原有取代基位置较远的位置。同时受热稳定性的影响, $\beta$ 位取代萘的热稳定性要明显好于 $\alpha$ 位取代萘。因此,从图3中看出,经历火驱后,二甲基萘化合物中1,7-二甲基萘、1,3-二甲基萘、1,6-二甲基萘含量明显降低,并且1,7-二甲基萘与1,3-二甲基萘+1,6-二甲基萘由火驱前的前高后低型分布变为前低后高的近水平分布;三甲基萘化合物中1,2,5-三甲基萘含量明显增加、1,2,4-三甲基萘几乎消失,1,4,6-三甲基萘+1,3,5-三甲基萘与2,3,6-三甲基萘由火驱前的前高后低型分布变为明显的前低后高型分布。需要注意的是原油在火驱过程中不止是在甲基萘内部之间的脱甲基、

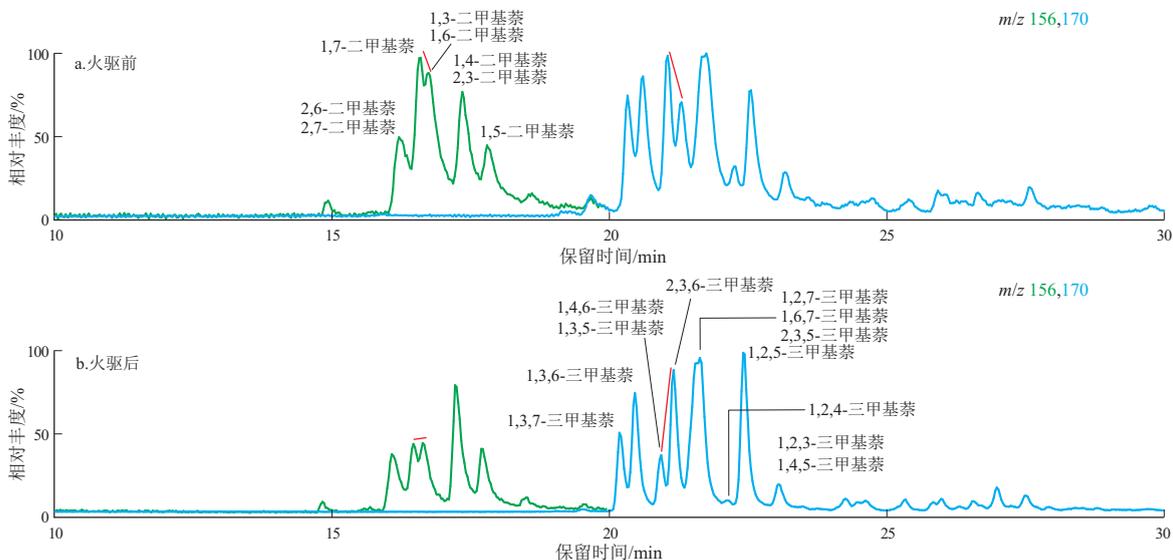


图3 原油火驱前后萘系列化合物对比

Fig.3 Comparison of naphthalene series compounds in crude oil before and after fire flooding

甲基迁移、甲基取代反应,还存在其他大分子化合物裂解生成甲基萘的系列产物。

## 2.4 菲系列

菲系列为三环芳烃化合物,它的三个环并不处于同一条直线上,菲系列广泛存在于原油及沉积有机质中,主要来自甾类和萜类化合物<sup>[29]</sup>,化石燃料的燃烧也可以产生大量的菲系列化合物,包括菲(P)、甲基菲(MP)、二甲基菲(DMP)、三甲基菲(TMP)、四甲基菲(TeMP)甚至5个甲基的菲系列。

菲系列化合物在原样中的整体分布规律为DMP>TMP>MP>TeMP>P,经历火驱后菲系列化合物的分布规律保持不变。甲基菲的异构体包括4种,分别为3-甲基菲、2-甲基菲、9-甲基菲和1-甲基菲,其中3-甲基菲、2-甲基菲为 $\beta$ 型,9-甲基菲、1-甲基菲为 $\alpha$ 型,甲基菲成熟度参数是基于其异构体的热稳定性建立的,与萘系列化合物相似,受甲基菲空间效应的影响, $\beta$ 型甲基菲的稳定性要好于 $\alpha$ 型甲基菲<sup>[30]</sup>。在火驱前甲基菲在原油中的分布模式为9-甲基菲>1-甲基菲>2-甲基菲>3-甲基菲(图4),火驱后,甲基菲的分布模式为2-甲基菲>1-甲基菲>9-甲基菲>3-甲基菲,呈现明显的9-甲基菲和1-甲基菲含量减小、2-甲基菲和3-甲基菲含量增加的特征,并且菲的含量较火驱前明显增加。该变化特征可以用甲基菲比(MPR)( $MPR = 2\text{-甲基菲}/1\text{-甲基菲}$ )和甲基菲指数(MPI)[ $MPI = 1.5 \times (3\text{-甲基菲} + 2\text{-甲基菲}) / (\text{菲} + 9\text{-甲基菲} + 1\text{-甲基菲})$ ]来表示,MPR由火驱前的0.85变为0.93, MPI由火驱前的0.51增加为0.73(表4),这一现

表 4 原油火驱前后菲系列化合物对比

Table 4 Relative content of phenanthrene series compounds in crude oil before and after fire flooding

| 原油类型 | 相对含量/% |       |       |       |      | MPR  | MPI  |
|------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|
|      | 菲      | 甲基菲   | 二甲基菲  | 三甲基菲  | 四甲基菲 |      |      |
| 火驱前  | 5.14   | 15.14 | 40.76 | 31.72 | 7.24 | 0.85 | 0.51 |
| 火驱后  | 6.70   | 17.34 | 39.07 | 27.88 | 9.00 | 0.93 | 0.73 |

象说明在甲基菲系列化合物在原油火驱过程中,不但甲基的位置发生了转移,即由热不稳定的异构体向热稳定的异构体发生转移,导致1-甲基菲和2-甲基菲相对含量的增加,同时还发生了明显的脱甲基作用,使得无取代基的菲化合物含量明显增加。此外,由于菲是由三个苯环共用相邻碳原子稠合而成,每个碳原子均以 $sp^2$ 杂化轨道与相邻的碳原子形成碳碳 $\sigma$ 键,每个碳原子的p轨道相互平行,侧面重叠形成一个闭合共轭大 $\pi$ 键,苯环中的 $\pi$ 键不易打开,因此碳碳键断裂的位置更容易发生在侧链位置,苯环则很难发生断裂。

## 2.5 二苯并噻吩

二苯并噻吩具有对称的分子结构,其热稳定性较高。从图5可以看出,二苯并噻吩的3种甲基取代化合物分布特征由火驱前的前高后低倒“V”型转化为了火驱后的近直线型,初步分析认为,一方面可能是经历火驱后原油中4-甲基二苯并噻吩含量增加,另一方面可能是3-甲基二苯并噻吩在火驱高温环境下发生裂解后含量降低。结合3种不同位置取代基的甲基二苯并噻吩热稳定性进一步

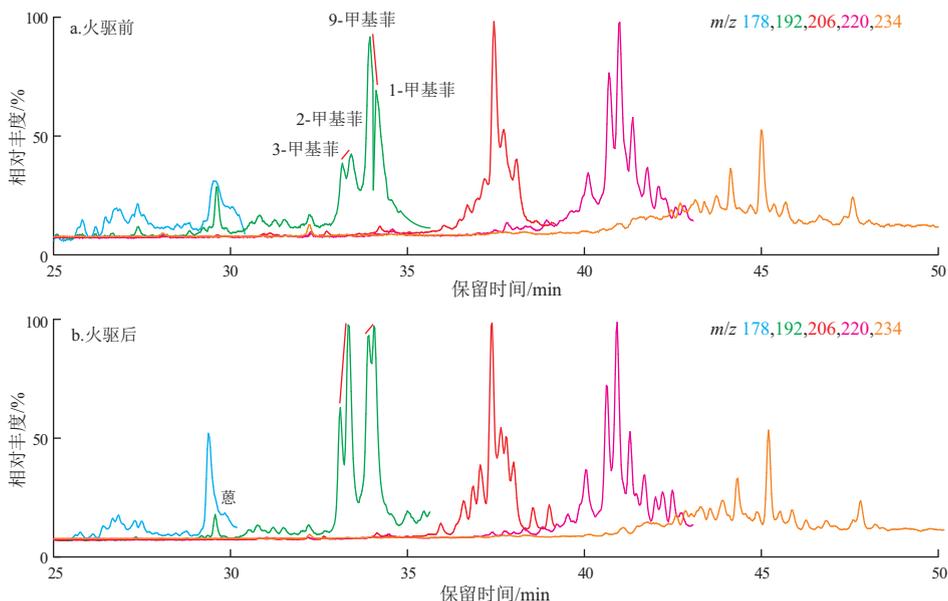


图 4 原油火驱前后菲系列化合物对比

Fig.4 Comparison of phenanthrene series compounds in crude oil before and after fire flooding

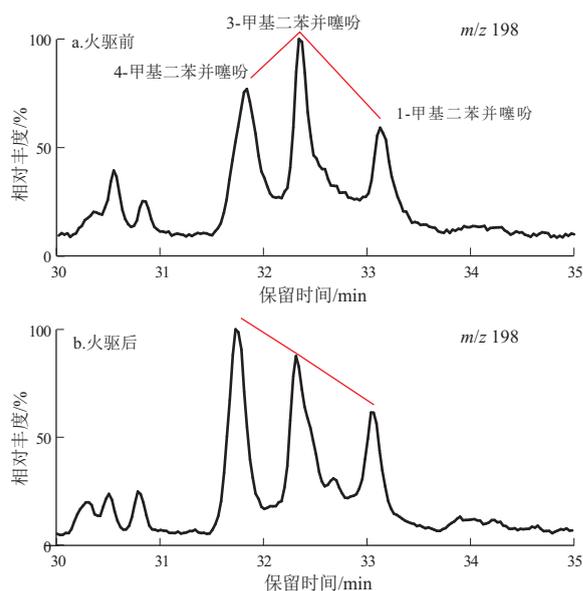


图 5 原油火驱前后甲基二苯并噻吩对比  
Fig.5 Comparison of methyl dibenzothiophene in crude oil before and after fire flooding

分析认为,在烷基二苯并噻吩中热稳定性的排序为 4-甲基二苯并噻吩>3-甲基二苯并噻吩>1-甲基二苯并噻吩<sup>[27,31]</sup>,这与前面论述的甲基菲异构体变化特征相似,热稳定性较强的 4-甲基二苯并噻吩的相对含量随热演化程度的升高而逐渐增加,1-甲基二苯并噻吩热稳定性差的异构体相对含量减少,这与图 6 中甲基二苯并噻吩在火驱前后的变化规律是一致的,因此,可以用甲基二苯并噻吩相对含量的变化来判断火驱的高温氧化。

### 2.6 稠环芳烃

稠环芳香烃(PAHs)指的是分子中含有两个或两个以上苯环结构的化合物,在自然界,它主要存在于煤、石油、焦油和沥青中,也可以由含碳氢元素

的化合物不完全燃烧产生,化石燃料的燃烧可以产生多种稠环芳香烃<sup>[32]</sup>。

本次研究的火驱前后的原油样品中含有丰富的稠环芳烃,包括荧蒽、芘、蒽、甲基蒽、苯并芘和菲。五环芳烃中的菲/苯并[e]芘比值受热演化作用影响明显,随着热演化程度的增加,该比值下降明显,从图 6 中看出火驱前后苯并[e]芘和菲始终保持前低后高的形态分布,通过对峰面积进行积分计算可以看出,火驱前该菲/苯并[e]芘比值为 4.348,经历火驱后该比值明显降低至 2.581。荧蒽和芘这两种化合物虽然都是 4 个环的稠环芳烃,芘是由 4 个六元环组合而成,荧蒽除 3 个六元环外,还有一个是五元环,五元环稳定性明显不如六元环,并且荧蒽容易发生降解<sup>[33]</sup>,造成火驱前原油样品中荧蒽/芘的比值较低,仅仅为 0.095,火驱后原油中该比值则明显上升至 0.173。值得注意的是在火驱后的原油中检测到了蒽这种三元环的稠环芳烃,以蒽与菲的比值来表示蒽含量的多少,一般认为,该比值小于 0.10 为石油源,大于 0.10 则是燃烧源为主<sup>[28]</sup>。蒽在原样品中几乎检测不到,原油中蒽与菲的比值为 0,经历火烧后,该比值增加到 0.243,明显大于 0.10,符合燃烧源的特征,这也与火驱的反应机理一致。考虑到菲的含量在火烧后也有增加,因此,蒽的实际增加量应该更高,蒽这种化合物具有热稳定性的优势,可以将该化合物作为原油经历火驱高温后的标志物。

### 3 结论

(1)原油中芳烃化合物是稠油火驱过程中指示高温氧化燃烧状态的良好指标,可以作为火驱过

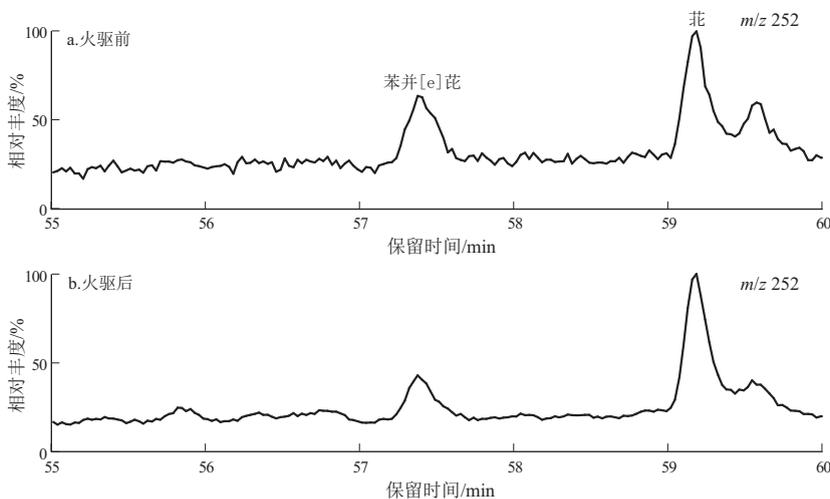


图 6 原油火驱前后稠环芳烃中芘和苯并[e]芘对比

Fig.6 Comparison of perylene and benzo[e]pyrene in crude oil before and after fire flooding

程中指示燃烧状态的物质,夯实了火驱燃烧状态的判识方法。

(2)芳烃化合物中 $\beta$ 构型萘与非化合物的热稳定性要明显好于 $\alpha$ 构型,火驱过程中萘系列化合物与非系列化合物均容易发生脱甲基、甲基迁移以及甲基取代反应。

(3)利用4-甲基二苯并噻吩与1-甲基二苯并噻吩热稳定性的差异,可以根据其相对含量的变化和谱图分布特征判断火驱高温氧化。

(4)稠环芳烃中蒽可以作为火驱高温氧化的标志物,萘/苯并[e]芘、荧蒽/芘、蒽/菲比值的變化也是指示火驱高温氧化的良好指标。

#### 参考文献:

- [1] 才业.水淹稠油油藏火驱开发受效特征研究[J].特种油气藏,2020,27(5):125-131.  
CAI Ye. Study on the response characteristics of fire flooding in water-flooded heavy oil reservoirs[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 27(5):125-131.
- [2] 关文龙,席长丰,陈亚平,等.稠油油藏注蒸汽开发后期转火驱技术[J].石油勘探与开发,2011,38(4):452-462.  
GUAN Wenlong, XI Changfeng, CHEN Yaping, et al. Fire-flooding technologies in post-steam-injected heavy oil reservoirs[J].Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4):452-462.
- [3] 李秋,何厚锋,关文龙,等.稠油油藏火驱驱替特征实验研究[J].油气地质与采收率,2021,28(6):79-86.  
LI Qiu, HE Houfeng, GUAN Wenlong, et al. Experimental study on displacement characteristics of fire flooding in heavy oil reservoirs[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6):79-86.
- [4] 张方礼,卢昶昊,马宏斌,等.辽河油田火驱开发技术进展[J].特种油气藏,2020,27(6):12-19.  
ZHANG Fangli, HU Changhao, MA Hongbin, et al. Development of fire flooding technology in Liaohe Oilfield[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6):12-19.
- [5] 赵睿智,陈明贵,高飞,等.厚层稠油油藏直平组合火驱优化[J].断块油气田,2020,27(2):233-237.  
ZHAO Ruizhi, CHEN Minggui, GAO Fei, et al. In-situ combustion optimization of vertical and horizontal wells combination for heavy oil reservoirs with thick layer[J].Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(2):233-237.
- [6] 蒋海岩,李晓倩,高成国,等.火驱阶段特征对比与分析[J].油气藏评价与开发,2020,10(5):114-119.  
JIANG Haiyan, LI Xiaoqi, GAO Chengguo, et al. Comparison and analysis of stage feature of in situ combustion[J].Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5):114-119.
- [7] 关文龙,宫宇宁,唐君实,等.多层油藏火驱开发模式探讨[J].特种油气藏,2020,27(6):60-66.  
GUAN Wenlong, GONG Yuning, TANG Junshi, et al. Study on fire flooding development mode of multi-layer reservoirs[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6):60-66.
- [8] 关文龙,吴淑红,梁金中,等.从室内实验看火驱辅助重力泄油技术风险[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(4):67-72.  
GUAN Wenlong, WU Shuhong, LIANG Jinzhong, et al. The research on engineering risk in combustion assisted gravity drainage based on indoor experiment[J].Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(4):67-72.
- [9] 彭小强,韩晓强,杨洋,等.水平井火驱辅助重力泄油燃烧状态及燃烧前缘预测[J].新疆石油地质,2020,41(2):199-203.  
PENG Xiaoqiang, HAN Xiaoqiang, YANG Yang, et al. Combustion state and burning front prediction during combustion assisted gravity drainage process in horizontal wells[J].Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(2):199-203.
- [10] 程宏杰,顾鸿君,刁长军,等.注蒸汽开发后期稠油藏火驱高温燃烧特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(4):426-429.  
CHENG Hongjie, GU Hongjun, DIAO Changjun, et al. Research on high temperature combustion properties in heavy oil reservoir in the late period of steam injection development[J].Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(4):426-429.
- [11] 王延杰,顾鸿君,程宏杰,等.注蒸汽开发后期稠油油藏火驱燃烧特征评价方法[J].石油天然气学报,2012,34(10):125-128.  
WANG Yanjie, GU Hongjun, CHENG Hongjie, et al. Evaluation method for in-situ combustion characteristics in heavy-oil reservoirs at the late stage of steam injection[J].Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(10):125-128.
- [12] 刘应忠,胡士清.高3-6-18块火烧油层跟踪效果评价[J].长江大学学报(自然科学版),2009,6(1):52-56.  
LIU Yingzhong, HU Shiqing. Trace research on Gao 3-6-18 in situ combustion[J].Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2009, 6(1):52-56.
- [13] 金兆勋.高3618块火烧油层试验效果跟踪研究[J].石油地质与工程,2011,25(5):121-123.  
JIN Zhaoxun. Trace research on Gao3618 in situ combustion testing effect[J].Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(5):121-123.
- [14] 关文龙,马德胜,梁金中,等.火驱储层区带特征实验研究[J].石油学报,2010,31(1):100-104.  
GUAN Wenlong, MA Desheng, LIANG Jinzhong, et al. Experimental research on thermodynamic characteristics of in-situ combustion zones in heavy oil reservoir[J].Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1):100-104.
- [15] 刘其成,刘宝良,程海清.超稠油油藏火驱辅助重力泄油技术实验研究[J].特种油气藏,2015,21(1):84-87.  
LIU Qicheng, LIU Baoliang, CHENG Haiqing. Propagation and control of fire front in the combustion assisted gravity drainage process using horizontal wells[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 21(1):84-87.
- [16] 梁金中,关文龙,蒋有伟,等.水平井火驱辅助重力泄油燃烧前缘展布与调控[J].石油勘探与开发,2012,39(6):720-727.  
LIANG Jinzhong, GUAN Wenlong, JIANG Youwei, et al. Propagation and control of fire front in the combustion assisted gravity drainage process using horizontal wells[J].Petroleum Explora-

- tion and Development, 2012, 39(6): 720-727.
- [17] 何继平,刘静,牛丽,等.气相色谱法分析火驱产出气[J].石油与天然气化工, 2010, 39(4): 352-353.  
HE Jiping, LIU Jing, NIU Li, et al. Analysis of the production gas of combustion driving by gas chromatography[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2010, 39(4): 352-353.
- [18] 杨智,廖静,高成国,等.红浅1井区直井火驱燃烧区带特征[J].大庆石油地质与开发, 2019, 38(1): 89-93.  
YANG Zhi, LIAO Jing, GAO Chengguo, et al. Characteristics of the in-situ-combustion zone for the vertical well in well block HQ1[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(1): 89-93.
- [19] 杨俊印.火烧油层(干式燃烧)室内实验研究[J].特种油气藏, 2011, 18(6): 96-99.  
YANG Junyin. Lab experimental study on in situ combustion (dry combustion) [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(6): 96-99.
- [20] 张方礼,赵庆辉,闫红星,等.指纹分析技术在火驱燃烧状态识别中的应用[J].特种油气藏, 2015, 22(6): 80-84.  
ZHANG Fangli, ZHAO Qinghui, YAN Hongxing, et al. Application of signature analysis technique in identification of fire flood combustion state [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 80-84.
- [21] 杨俊印,闫红星,刘家林,等.杜66块火驱典型产出流体变化特征[J].特种油气藏, 2020, 27(3): 137-141.  
YANG Junyin, YAN Hongxing, LIU Jialin, et al. Typical production fluid properties of fire-flooding in block Du66[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 137-141.
- [22] 刘雪,李美俊,唐友军,等.石油中不同环数芳烃化合物的精细分离和制备[J].石油实验地质, 2021, 43(3): 524-531.  
LIU Xue, LI Meijun, TANG Youjun, et al. An improved column-chromatographic separation for polycyclic aromatic compounds in petroleum [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3): 524-531.
- [23] 闫红星.稠油火驱实验原油色谱指纹特征对比[J].新疆石油地质, 2021, 42(5): 592-597.  
YAN Hongxing. Comparison of chromatographic fingerprint characteristics of heavy oil based on fire flooding experiments [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(5): 592-597.
- [24] 王传远,杜建国,段毅,等.芳香烃地球化学特征及地质意义[J].新疆石油地质, 2007, 28(1): 29-32.  
WANG Chuanyuan, DU Jianguo, DUAN Yi, et al. Geochemical characteristics and significance of aromatic hydrocarbon in oil and gas [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 29-32.
- [25] 陈致林,李素娟,王忠.低—中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究[J].沉积学报, 1997, 15(2): 192-197.  
CHEN Zhilin, LI Sujuan, WANG Zhong. A study on maturity indicators some of some aromatics in low-midmature thermal evolution zones [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 192-197.
- [26] 李美俊,王铁冠.原油中烷基苯的形成机理及其成熟度参数应用[J].石油实验地质, 2005, 27(6): 606-611.  
LI Meijun, WANG Tieguan. The generating mechanism of methylated naphthalene series in crude oils and the application of their maturity parameters [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(6): 606-611.
- [27] 林红梅.渤海湾盆地车镇凹陷下古生界烃源岩生物标志物特征[J].石油实验地质, 2017, 39(2): 230-237.  
LIN Hongmei. Biomarker characteristics of Lower Paleozoic source rocks in Chezhen Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2): 230-237.
- [28] 孙永革,路清华,何毓新,等.塔里木盆地玉北1井原油成因再认识及其意义[J].石油实验地质, 2021, 43(5): 810-817.  
SUN Yongge, LU Qinghua, HE Yuxin, et al. Recognition of origin of crude oil from well Yubei 1 in Tarim Basin and its significance [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 810-817.
- [29] 宋长玉,金洪蕊,刘璇,等.烃源岩中甲基菲的分布及对成熟度参数的影响[J].石油实验地质, 2007, 29(2): 183-187.  
SONG Changyu, JIN Hongrui, LIU Xuan, et al. Distribution of methyl phenanthrene in sediments and its impacting on maturity parameters [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 183-187.
- [30] 郭瑞超,隋风贵,曾治平,等.芳烃参数重建原油成熟度及其在哈山地区的应用[J].石油实验地质, 2016, 38(5): 679-684.  
GUO Ruichao, SUI Fenggui, ZENG Zhiping, et al. Aromatic parameter reconstruction of crude oil maturity and its application in Hala' alate area [J]. Geochimica, 2016, 38(5): 679-684.
- [31] 赵兴齐,陈践发,郭望,等.开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块原油及烃源岩芳烃地球化学特征[J].地球化学, 2013, 42(3): 262-273.  
ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, GUO Wang, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbon in crude oil and source rocks from Nai 1 block of Naiman Depression, Kailu Basin [J]. Geochimica, 2013, 42(3): 262-273.
- [32] 万甜甜,张枝焕,贺光秀,等.土壤剖面部分多环芳烃源识别参数的纵向变化及成因[J].环境科学与技术, 2014, 37(6): 7-13.  
WAN Tiantian, ZHANG Zhihuan, HE Guangxiu, et al. Longitudinal change characters and source analysis of some polycyclic aromatic hydrocarbon source identification parameters in the soil profiles [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(6): 7-13.
- [33] 张枝焕,卢另,贺光秀,等.北京地区表层土壤中多环芳烃的分布特征及污染源分析[J].生态环境学报, 2011, 20(4): 668-675.  
ZHANG Zhihuan, LU Ling, HE Guangxiu, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in topsoil of Beijing, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(4): 668-675.