

# 油气包裹体分子组成的热释—色谱—质谱分析

陈彦鄂<sup>1,2</sup>, 张志荣<sup>1,2</sup>, GREENWOOD Paul<sup>3</sup>

(1. 中国石化 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

3. 西澳大学, 澳大利亚 珀斯 WA6009)

**摘要:** 油气包裹体分子组成对油气成藏研究来说具有较大的应用价值。由于油气包裹体中所含物质的量不能满足常规化学仪器分析的要求, 因此通常需要研发定制仪器且实现难度较大, 从而限制了该技术的推广应用。采用热释—色谱—质谱法对澳大利亚 Halibut 油田原油的人工合成包裹体、澳大利亚 Jabiru 油田和塔河油田油气包裹体样品进行了烃类组成分析。正构烃类、单、双以及三环芳烃等组分能够被有效检测到, 检出化合物的最高碳数超过了 C<sub>30</sub>。该方法与其他手段分析结果具有较高的可比性, Jabiru 油田包裹体热释—色谱—质谱分析与包裹体分子组成离线分析(MCI, Molecular Composition of Inclusion)的结果对比显示, 芳烃化合物的成熟度参数仅有微小的差异, 两种方法获得的包裹体烃类成熟度均明显低于产出原油, 印证了油气流体在被捕获形成包裹体后能够避免后期改造的影响。热释法作为一种通用的常规方法, 同样适用于油气包裹体的分析, 相比于其他手段, 该方法更加便捷。

**关键词:** 油气包裹体; 生物标志物; 热释法; 色谱—质谱

中图分类号: TE135

文献标识码: A

## Pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry analyses of oil-bearing fluid inclusions composition

CHEN Yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhirong<sup>1,2</sup>, GREENWOOD Paul<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. University of Western Australia, Perth, WA 6009, Australia)

**Abstract:** The molecular compositions of oil-bearing fluid inclusions (FIs) are valuable for the research of oil and gas accumulation; however, due to the very trace amount of materials included, the requirements of commercial instruments cannot be satisfied and thus custom designed instruments were needed for this method, which is difficult to be achieved and the application for the molecular composition of FIs have been limited. In this paper, three samples of oil-bearing FIs were analyzed by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry (Py-GC-MS) to obtain their hydrocarbon composition. The first sample was a synthetic inclusion prepared by the occlusion of a small amount of crude oil from the Halibut oil field, the second sample was from Australian Jabiru oil field and the third sample was collected from the Tahe oil field in the northwestern China. A diverse range of aliphatic compounds, including *n*-alkanes, mono-, di- and tricyclic aromatic hydrocarbons and other components have been successively detected from these materials of which, the *n*-alkanes were monitored up to carbon numbers over C<sub>30</sub>. Also, the results showed that the method introduced here gave comparable molecular characteristics with data obtained from other traditional methods. The mature degree calculated from Py-GC-MS is very close to that of MCI method. However, it is also notable that the thermal maturity parameters calculated from the results of inclusion analysis were much lower than those of crude oil, indicating modification caused by late-stage alteration to oils in reservoir. As a conventional and easy performed analytical method specially designed for the degradation of macromolecule, the Py-GC-MS demonstrated here is also suitable for the analysis of FIs.

**Key words:** oil-bearing; fluid inclusion; biomarkers; pyrolysis; GC-MS

沉积岩中广泛发育流体包裹体, 其中, 油气包裹体常常含有液态烃类, 其组成特征对油气成藏研

究具有重要的应用价值, 如油气包裹体中烃类物质的组成可用于油—源精确对比、反映油气充注时

间、油气运移路径等<sup>[1-6]</sup>。

包裹体气态物质组成可通过冷热台测得的均一温度进行估算<sup>[7-9]</sup>,也可以用激光拉曼光谱进行测定<sup>[10-11]</sup>。但明确的气态分子组成仍需通过色谱—质谱分析才能获取,要通过物理破碎的方法来打开油气包裹体<sup>[2,12]</sup>,进而得到其分子组成。20世纪90年代以来,澳大利亚学者研发了多种油气包裹体的分析方法,如将密封的微型容器安装在色谱进样口并在其中实现包裹体的机械破碎,包裹体中的烃类物质直接进入色谱—质谱仪分析,称为包裹体分子组成在线分析(MSSV-Py, Microscale Sealed Vessel Pyrolysis)<sup>[13]</sup>;此外,包裹体在有机溶剂中机械破碎,释放的烃类物质即被溶解在溶剂中经浓缩后可进行后续地球化学分析,这种方法称之为MCI法<sup>[1,13]</sup>。

针对油气包裹体个体较小的特点,一些激光微区分析技术相继出现。例如用红外激光通过显微镜聚焦在油气包裹体上,其中原油组分能吸收红外激光的热能而膨胀、爆裂,油气组分得以释放<sup>[14]</sup>;利用飞秒激光或者准分子激光剥蚀掉油气包裹体的宿主矿物,油气组分被载气吹扫进入色谱—质谱仪,实现包裹体烃类物质的分析<sup>[15-19]</sup>,这些微区分析方法可以选择性地打开群体甚至是单个包裹体来完成分析。由于油气包裹体的体积非常小,而其中的化合物种类却很多且分子量和沸点的分布范围非常宽,这对分析系统的灵敏度、传输系统的高温稳定性要求极高。目前此项技术分析成功率还不够高,这在一定程度上限制了其应用价值;此外,对于一些成藏过程相对简单的地区来说,群体包裹体分析同样能够提供有价值的信息,且分析成功率更高。

中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所前期研发了油气包裹体分子组成系列方法,包括群体包裹体离线法、单体油气包裹体激光剥蚀—色谱—质谱在线分析法等<sup>[16-17]</sup>,但都需要设计和研发相应的仪器装备来实现。本文在前人成果的基础上,借鉴了开放体系热解色谱—质谱分析技术,将其应用于油气包裹体的分析领域,试图在商业化仪器平台上建立群体包裹体分析技术,以促进油气包裹体分子组成技术的应用和推广。

## 1 样品与实验

### 1.1 油气包裹体样品

为了与前期研究进行对比,评价本文方法的可靠性,对澳大利亚 Halibut 油田的原油人工合成包裹体进行分析,同时也选用澳大利亚 Jabiru 油田、

中国塔里木盆地塔河油田的油气包裹体进行分析。为了去除表面吸附的烃类物质,获取准确的包裹烃类的分子组成特征,包裹体样品在分析之前都用二氯甲烷进行了彻底清洗。

#### 1.1.1 人工合成包裹体

采用结晶沉淀法<sup>[14,20]</sup>对 Halibut 原油进行人工包裹体的制备。其基本原理为:KCl 过饱和溶液在冷却的过程中析出晶体,在此过程中,与上层原油接触面上的晶体可包裹一定量的原油形成人工合成包裹体。此外,为了进行数据对比,Halibut 原油也进行了气相色谱分析以获取其烃类组成。

#### 1.1.2 Jabiru 含油包裹体

样品取自澳大利亚北部地区的 Jabiru 油田的砂岩段,其中石英颗粒样品中含有丰富的含油包裹体,在紫外灯下显示出蓝色荧光<sup>[21-22]</sup>。这些含油包裹体主要分布在石英次生加大、粒间及裂隙中,同时贯穿石英颗粒和次生加大<sup>[21]</sup>。Jabiru 包裹体样品的深度为 1 637 m。前人对 Jabiru 含油包裹体进行了大量的岩石学<sup>[21,23]</sup>和地球化学<sup>[1,13,22,24-25]</sup>研究,本文在对 Jabiru 包裹体样品进行分析的同时,也与前人的结果进行了对比。

#### 1.1.3 塔河油田含油包裹体

塔里木盆地塔河油田的奥陶系碳酸盐岩储层较为发育,储层样品中具有明显的含油包裹体分布且在方解石脉以及石英裂隙中尤为丰富。前期研究表明,T901 井(5 700 m)样品中捕获了黄色和蓝色两期含油包裹体<sup>[16]</sup>。单体包裹体激光剥蚀色谱—质谱在线分析结果表明黄色荧光包裹体烃类物质中含有相对较高的芳烃化合物,蓝色荧光包裹体则相对富含低分子量的饱和烃类物质<sup>[16]</sup>。

### 1.2 热释法色谱—质谱在线分析

将约 30 mg 的包裹体样品采用 CDS 5000 型热释器以 130 °C/ms 的速率从室温升至 650 °C 并保持 20 s。样品中的含油包裹体在热力的作用下内压升高并爆裂,从而实现包裹烃类的释放。热释器与色谱进样口的传输线保持在 300 °C,采用 Agilent 6890-5973 型色谱—质谱仪进行烃类化合物的检测。色谱进样口采用分流模式(分流比 30:1),采用 DB5-MS 石英弹性毛细柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm)。色谱初始炉温为 40 °C(保持 2 min),以 6 °C/min 的速率升温至 290 °C(保持 15 min)。质谱检测方式为全扫描,扫描范围为  $m/z$  50~550,离子化电压为 70 eV,离子源温度为 250 °C。

### 1.3 全油色谱

Halibut 原油采用了 Varian 3400 型气相色谱进

行烃类化合物的直接检测,采用 He 作为载气,分流模式(50 : 1)进样口保持在 310 ℃,采用 DB1 石英弹性毛细柱进行化合物分离(60 m×0.25 mm×0.32 μm),色谱初始炉温为 10 ℃(保持 2 min)并以 4 ℃/min 的速率升至 300 ℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Halibut 原油及其人工合成包裹体

图 1 为澳大利亚 Halibut 原油的人工合成包裹体热释法色谱—质谱总离子图以及  $m/z$  85 质量色谱图,后者显示了脂肪烃类化合物的组成特征,包括  $nC_8$ — $nC_{33}$  的正构烷烃、 $iC_{13}$ — $iC_{20}$  的类异戊二烯烃类(包括姥鲛烷、植烷)等。通过对比发现,人工合成包裹体(图 1a, b)及其原始原油(图 1c)的正构烷烃与类异戊二烯烃类化合物的分布特征具有较高的相似性(图 2)。

值得注意的是,本文方法的分析结果中并未检测到烃类化合物,此类化合物通常是有机质热裂解的产物,因此证明该方法主要是通过热爆裂的原理达到油气包裹体中烃类物质释放的目的。

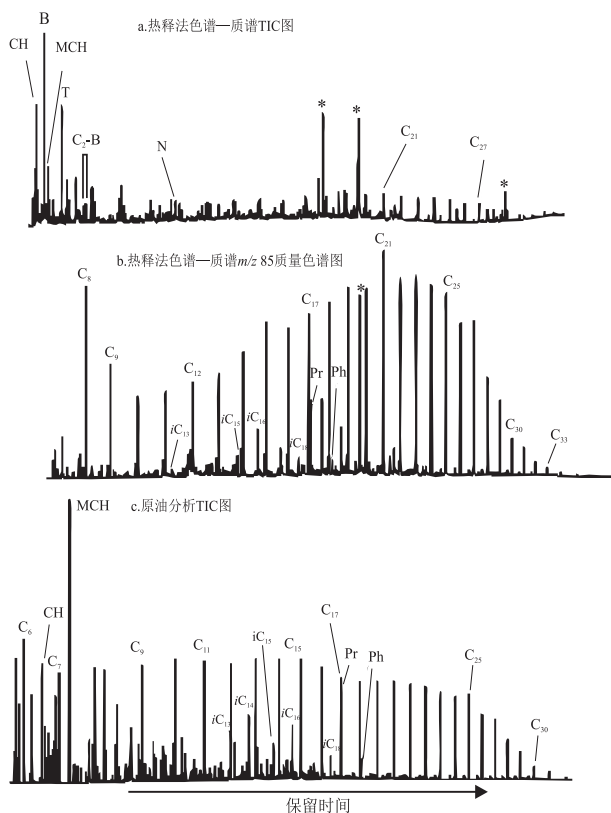


图 1 澳大利亚 Halibut 油田原油人工包裹体组分对比

\* 为柱流失等未知物;CH.环己烷;MCH.甲基环己烷;B.苯; T.甲苯;C<sub>2</sub>-B.邻+间+对二甲苯;N.萘;C<sub>n</sub>.正构烷烃; iC<sub>n</sub>.异构烷烃;Pr.姥鲛烷;Ph.植烷

Fig.1 Hydrocarbon composition of synthetic inclusion from Halibut oil field, Australia

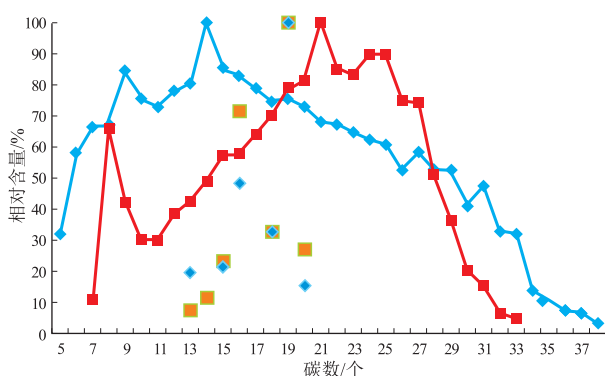


图 2 澳大利亚 Halibut 油田 Halibut-1A 人工包裹体以及原油中正构烷烃和类异戊二烯化合物相对含量对比  
 正方形数据为 Halibut-1A 人工包裹体;  
 菱形数据为原油;连线为正构烷烃;散点为类异戊二烯  
 Fig.2 Relative content of  $n$ -alkene and isoprene compounds of synthetic inclusions and crude oil from Halibut oil field, Australia

此外,全油色谱与人工合成包裹体热爆裂的分析结果之间的差异性主要体现在环己烷(CH)、甲基环己烷(MCH)以及低分子量正构烷烃和芳烃化合物。例如,Halibut 全油分析结果表明 CH 的相对含量约为 MCH 的 30%,而人工包裹体分析结果中 CH 是 MCH 的 145%。前人研究表明水洗作用可导致原油分析中几乎不含苯,仅有痕量的甲苯<sup>[26]</sup>,但这些芳烃化合物在人工合成包裹体中的含量却很高(图 1a)。前人在采用 MSSV-Py 进行包裹体分析研究时也发现了这种现象,为这些化合物在水中的溶解度较大所导致,而人工合成包裹体是在水溶液中进行的,因此这些化合物会在包裹体中相对富集<sup>[23]</sup>。由此可见,含油包裹体中含有较多的芳烃化合物,这与流体捕获形成包裹体的过程密切相关。

从检测分子量的范围来看,检测到的化合物碳数最高可达 C<sub>33</sub>(图 1b),明显超越了此前 MSSV-Py 以及激光微裂解的 C<sub>21</sub> 检测限<sup>[14]</sup>。包裹体 MSSV-Py 与本文方法使用的样品量相当,造成高分子量缺失的原因可能是由于传输线的性能不足以满足高分子量烃类组分的要求;此外,包裹体机械破碎分析的结果表明,破碎的矿物表面(如石英)也对高分子量烃类具有明显的吸附作用<sup>[13]</sup>。而人工合成包裹体中低分子量烃类(<C<sub>19</sub>)的相对含量低于原油,这可能是由于人工合成包裹体在开放体系下进行,在此过程中挥发性轻质组分容易散失而导致的(KCl 晶体包裹体需要在 60 ℃的条件下进行<sup>[14]</sup>)。

### 2.2 Jabiru 包裹体

图 3 为 Jabiru 包裹体热释法的总离子图以及  $m/z$  85 质量色谱图。Jabiru 包裹体热释法的主要

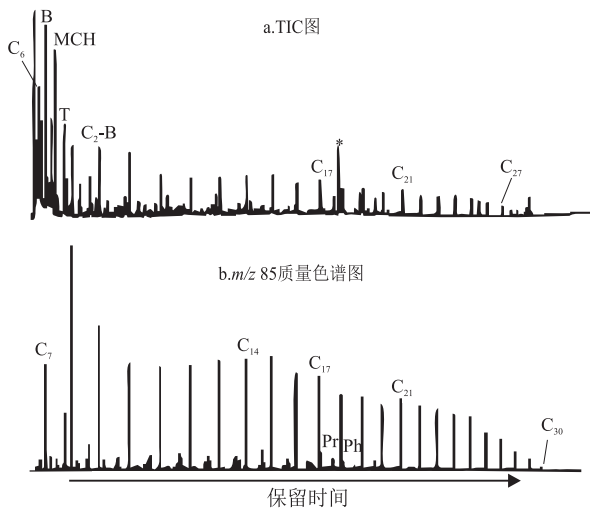


图 3 澳大利亚 Jabiru 油田 Jabiru 包裹体热释法色谱—质谱分析结果

Fig.3 Py-GC-MS of inclusions from Jabiru oil field, Australia

产物是正构烷烃,其中轻质组分( $<C_{15}$ )相对含量较高,最高检测碳数为  $C_{30}$ 。Jabiru-1A 原油以及含油包裹体分子组成(MCI)分析结果<sup>[1, 13]</sup>与本文分析结果具有较高的可比性,如主峰为  $C_8$ <sup>[13, 25]</sup>。然而原油饱和烃组分的气相色谱显示主峰为  $C_{15}$ <sup>[13]</sup>,这是由于在原油族组分分离过程中轻质组分的损失所导致的<sup>[27]</sup>。该原油样品的全油色谱分析结果同样显示出相对富集的轻质组分<sup>[25]</sup>,而对于高分子量烃类来说,本文方法检测的结果同样高于 MSSV-Py 的分析结果<sup>[13]</sup>。

Jabiru 原油中苯、甲苯等芳烃化合物的含量也相对较高<sup>[25]</sup>。图 4 为 Jabiru 包裹体的芳烃化合物分布特征,包括甲基-、乙基-和二甲基萘(图 4a),三甲基萘(图 4b)以及菲和甲基菲(图 4c)。这些芳烃化合物的分布特征与前人发表的包裹体油、原油的分析结果基本一致<sup>[13]</sup>。从本文方法与前人的包裹体、原油分析结果中挑选的几个常用地球化学参数进行对比(图 5),总体上这些参数表现出较为接近的特征,而从成熟度参数来看,热爆裂法与 MCI 方法的分析结果表明包裹体成熟度明显低于原油。这说明包裹体捕获了早期充注的原油,这些组分在包裹体中避免了后期改造的影响。

### 2.3 塔河油田含油包裹体

塔河油田 T901 井含油包裹体热释法分析结果显示,总体上这些烃类组分以正构烷烃以及少量烯烃为主(图 6a)。如上文所述,热爆裂法分析的包裹体分子组成中并未检测到烯烃,而烯烃主要是地质大分子物质裂解的产物,这说明塔河油田 T901 井含油包裹体中除了常规原油组分外还可能存在

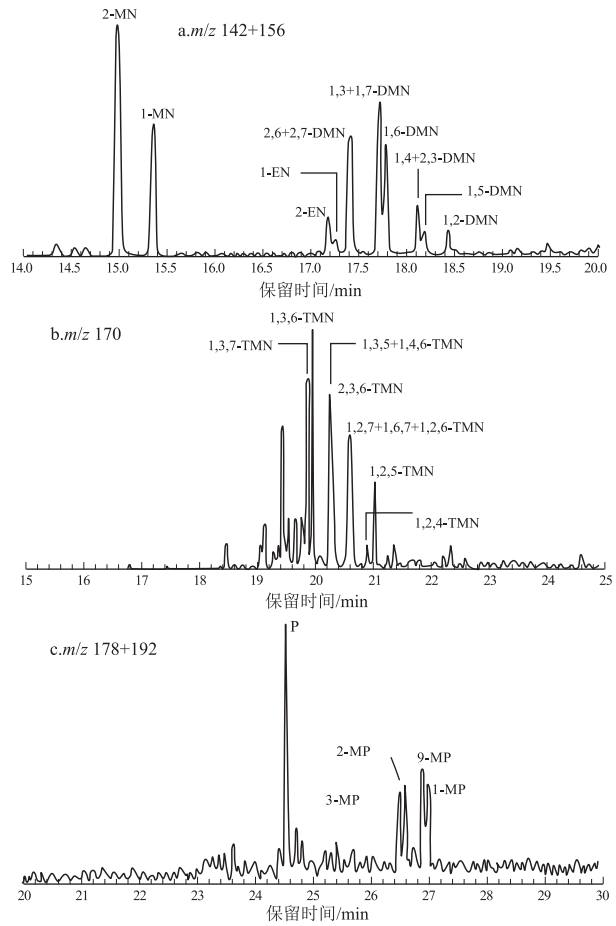


图 4 澳大利亚 Jabiru 油田包裹体热释法色谱—质谱分析及芳烃化合物质量色谱图

MN. 甲基萘; EN. 乙基萘; DMN. 二甲基萘; TMN. 三甲基萘; P. 菲; MP. 甲基菲

Fig.4 PAHs chromatograms of petroleum released from fluid inclusion (Jabiru oil field, Australia) with Py-GC-MS

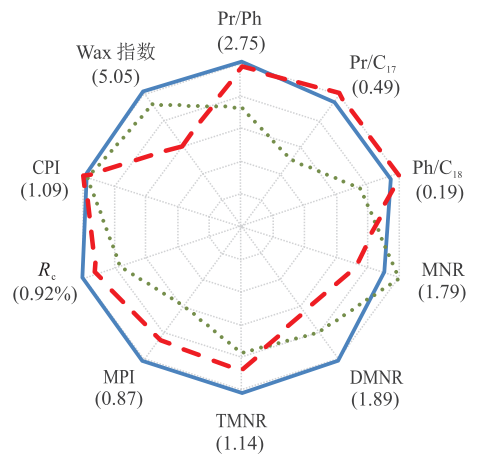


图 5 澳大利亚 Jabiru 油田包裹体及原油的成熟度参数对比  
Ph. 植烷, Pr. 姥鲛烷,  $R_r$ . 镜质体反射率, CPI. 碳优势指数, MPI. 甲基菲, TMNR. 三甲基萘指数, DMNR. 二甲基萘指数, MNR. 甲基萘指数;  
蓝色实线为 Jabiru 原油; 绿色点虚线为热释法色谱—质谱法;  
红色短划线为包裹体离线 MCI 法;  
MCI 法以及原油分析结果引自参考文献<sup>[13]</sup>。

Fig.5 Maturity parameters for inclusions and crude oil from Jabiru oil field, Australia



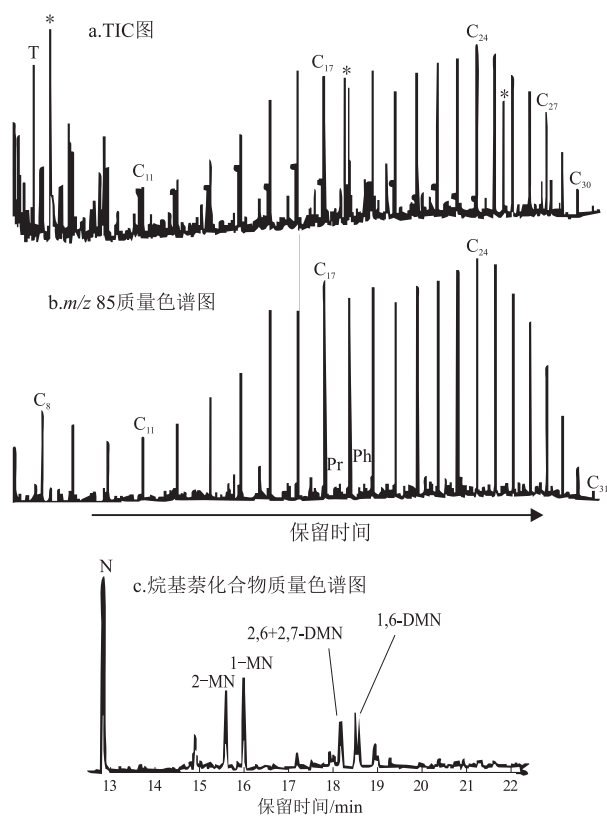


图6 塔里木盆地 T901 井包裹体热释法色谱—质谱分析结果  
化合物命名与前文相同。

Fig.6 Py-GC-MS of inclusions from well T901, Tarim Basin

大分子物质(如沥青等)。芳烃化合物,如烷基苯、烷基萘等的相对含量较低(图6c)。单体包裹体激光剥蚀分析结果表明,该样品中分别含有黄色和蓝色荧光的两期包裹体,而黄色荧光包裹体的相对含量高(占90%)<sup>[16-17]</sup>。本文方法的分析结果显示正构烷烃的分布范围 $nC_8$ — $nC_{31}$ ,这与黄色荧光的激光剥蚀分析结果是一致的,而其中低分子量烃类则可能是来自于蓝色荧光包裹体的贡献。虽然蓝色荧光包裹体中芳烃的相对含量较低<sup>[16]</sup>,但其贡献同样不可忽视(图6c)。

令人意外的是本文分析结果计算的成熟度参数(如甲基萘指数)为0.91,这比黄色(1.49)和蓝色(1.67)荧光包裹体激光剥蚀的分析结果都要低<sup>[16-17]</sup>。SIMONEIT等<sup>[28]</sup>报道过一些生物标志物成熟度参数在快速受热过程中会呈现出倒转的趋势,因此此处成熟度参数结果可能是由于热释法的快速加热造成的。但是其他样品,例如Jabiru含油包裹体的分析结果表明其成熟度要比机械破碎法高(图5),由此看来,导致成熟度参数出现倒转的也可能是因为样品中存在一定量的沥青大分子受热释放了相关化合物。

### 3 结论

(1)采用热释—色谱—质谱在线分析技术,对3种不同的含油包裹体进行了分子组成分析,从检测到的烃类化合物及其完整性来看,该方法与其他方法的分析结果具有较高的可比性,一些地球化学参数的可对比性较高。

(2)对于多期包裹体共存或包含沥青的包裹体来说,使用热释—色谱—质谱在线分析技术需要注意是否产生了裂解以及多期包裹体的相对贡献大小等,而对于成藏过程较为简单的样品来说,介绍了一种相对快速、简单的分析方法。相比国外报道的群体包裹体分析方法,如MSSV-Py方法需要特制仪器部件,MCI方法操作流程长、轻质烃类较为容易损失等,本方法更加适合于实验室的常规分析。对于多期包裹体共存的样品来说,单体包裹体激光剥蚀方法更加适用。然而在一些特殊情况下(例如包裹体个体过小、多期包裹体立体空间分布不能区分等),使用该方法同样能够获取有价值的地球化学信息。

#### 参考文献:

- [1] GEORGE S C, LISK M, EADINGTON P J, et al. Fluid inclusion record of early oil preserved at Jabiru field, Vulcan sub-basin[J]. Exploration Geophysics, 1997, 28(1/2): 66-71.
- [2] GEORGE S C, LISK M, EADINGTON P J, et al. Fluid inclusion record of early oil preserved at Jabiru field, Vulcan sub-basin[J]. Exploration Geophysics, 1997, 28(1/2): 66-71.
- [3] GEORGE S C, VOLK H, AHMED M. Geochemical analysis techniques and geological applications of oil-bearing fluid inclusions, with some Australian case studies [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 57(1/2): 119-138.
- [4] 刘德汉. 包裹体研究:盆地流体追踪的有力工具[J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 149-154.  
LIU Dehan. Fluid inclusion studies: an effective means for basin fluid investigation [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 149-154.
- [5] 高先志, 陈发景. 应用流体包裹体研究油气成藏期次:以柴达木盆地南八仙油田第三系储层为例[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 548-554.  
GAO Xianzhi, CHEN Fajing. Application of fluid inclusions to determination of the times and stages of hydrocarbon reservoir filling: a case study of Nanbaxian oilfield in the Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 548-554.
- [6] 饶丹, 秦建中, 许锦, 等. 塔河油田奥陶系油藏成藏期次研究[J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 83-88.  
RAO Dan, QIN Jianzhong, XU Jin, et al. Accumulation periods of Ordovician reservoirs in Tahe oil field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 83-88.

- [7] 李美俊,王铁冠,刘菊,等.由流体包裹体均一温度和埋藏史确定油气成藏时间的几个问题:以北部湾盆地福山凹陷为例[J].石油与天然气地质,2007,28(2):151-158.  
LI Meijun,WANG Tieguan,LIU Ju,et al.A discussion on hydrocarbon accumulation dating determined by homogenization temperature and burial history of fluid inclusions;an example from the Fushan Depression, Beibuwan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2):151-158.
- [8] 席斌斌,施伟军,张德会,等.迭代法计算  $H_2O-CO_2-NaCl$  包裹体均一压力的改进及其应用[J].矿床地质,2010,29(6):1138-1144.  
XI Binbin,SHI Weijun,ZHANG Dehui,et al.Improvements and application of iterative method for calculating homogenization pressure of  $H_2O-CO_2-NaCl$  inclusion system [J]. Mineral Deposits,2010,29(6):1138-1144.
- [9] 徐佑德,王林,刘子超,等.车排子地区火山岩油藏流体包裹体特征与成藏期次[J].断块油气田,2020,27(5):545-550.  
XU Youde,WANG Lin,LIU Zichao,et al.Characteristics of fluid inclusions and time frame of hydrocarbon accumulation for volcanic reservoirs in Chepaizi Uplift[J].Fault-Block Oil and Gas Field, 2020,27(5):545-550.
- [10] THIERY R,PIRONON J,WALGENWITZ F,et al.PIT (Petroleum Inclusion Thermodynamic): a new modeling tool for the characterization of hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements [J]. Journal of Geochemical Exploration,2000,69-70:701-704.
- [11] MUNZ I A.Petroleum inclusions in sedimentary basins; systematics, analytical methods and applications [J]. Lithos, 2001, 55(1/4):195-212.
- [12] 张宝收,杨海军,张甯,等.迪北气藏侏罗系阿合组烃包裹体特征及成藏分析[J].新疆石油地质,2019,40(1):41-47.  
ZHANG Baoshou,YANG Haijun,ZHANG Nai,et al.Hydrocarbon inclusion characteristics of Jurassic Ahe Formation and analysis on petroleum accumulation in Dibeï gas reservoir of Kuqa Depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(1):41-47.
- [13] GEORGE S C,LISK M,EADINGTON P J,et al.Comparison of palaeo oil charges with currently reservoired hydrocarbons using the geochemistry of oil-bearing fluid inclusions [C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference.Adelaide:SPE,1996.
- [14] GREENWOOD P F,GEORGE S C,HALL K.Applications of laser microprobe pyrolysis - gas chromatography - mass spectrometry [J]. Organic Geochemistry,1998,29(5/7):1075-1089.
- [15] VOLK H,FUENTES D,FUERBACH A,et al.First on-line analysis of petroleum from single inclusion using ultrafast laser ablation[J]. Organic Geochemistry,2010,41(2):74-77.
- [16] ZHANG Zhirong,GREENWOOD P,ZHANG Qu,et al.Laser ablation GC-MS analysis of oil-bearing fluid inclusions in petroleum reservoir rocks[J].Organic Geochemistry,2012,43:20-25.
- [17] 张志荣,张渠,席斌斌,等.含油包裹体在线激光剥蚀色谱-质谱分析[J].石油实验地质,2011,33(4):437-440.  
ZHANG Zhirong,ZHANG Qu,XI Binbin,et al.On-line analysis of oil-bearing fluid inclusions with laser ablation GC-MS [J]. Petroleum Geology & Experiment,2011,33(4):437-440.
- [18] 施伟军,席斌斌,秦建中,等.单体油气包裹体激光剥蚀在线成分分析技术:以塔河油田奥陶系储层为例[J].石油学报,2016,37(2):196-206.  
SHI Weijun,XI Binbin,QIN Jianzhong,et al.Online laser ablation compositional analysis technique for single hydrocarbon inclusion;a case study of the Ordovician reservoirs in Tahe oilfield, Tarim Basin,NW China[J].Acta Petrolei Sinica,2016,37(2):196-206.
- [19] 施伟军,蒋宏,席斌斌,等.油气包裹体成分及特征分析方法研究[J].石油实验地质,2009,31(6):643-648.  
SHI Weijun,JIANG Hong,XI Binbin,et al.Studies of analysis approaches of oil-and-gas inclusion composition and characteristics [J].Petroleum Geology & Experiment,2009,31(6):643-648.
- [20] PIRONON J.Synthesis of hydrocarbon fluid inclusions at low temperature [J].American Mineralogist,1990,75(1/2):226-229.
- [21] LISK M,EADINGTON P J.Oil migration in the Cartier trough, Vulcan sub-basin [C]//The sedimentary basins of western Australia; proceedings western Australian basins symposium. Perth: [s.n.], 1994:301-312.
- [22] BOURDET J,EADINGTON P,VOLK H,et al.Chemical changes of fluid inclusion oil trapped during the evolution of an oil reservoir: Jabiru-1, a case study (Timor Sea, Australia) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 36(1):118-139.
- [23] O'BRIEN G W,DUDDY M L I,EADINGTON P J,et al.Late Tertiary fluid migration in the Timor Sea;a key control on thermal and diagenetic histories? [J]. The APPEA Journal, 1996, 36(1):399-427.
- [24] PANG L S K,GEORGE S C,QUEZADA R A.A study of the gross compositions of oil-bearing fluid inclusions using high performance liquid chromatography [J]. Organic Geochemistry, 1998,29(5/7):1149-1161.
- [25] RUBLE T E,GEORGE S C,LISK M,et al.Organic compounds trapped in aqueous fluid inclusions [J]. Organic Geochemistry, 1998,29(1/3):195-205.
- [26] LAFARGUE E,BARKER C.Effect of water washing on crude oil compositions 1 [J].AAPG Bulletin,1988,72(3):263-276.
- [27] AHMED M,GEORGE S C.Changes in the molecular composition of crude oils during their preparation for GC and GC-MS analyses [J]. Organic Geochemistry,2004,35(2):137-155.
- [28] SIMONEIT B R T,KAWKA O E.Biomarker maturation in contemporary hydrothermal systems, alteration of immature organic matter in zero geological time [C]//Conference on biomarkers in petroleum; memorial symposium for Wolfgang K.Seifert.Dallas: American Chemical Society,1989.