

引用格式:侯剑锋,刘鹏刚,曹廷义.轻质原油注空气热特征及氧化动力学研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):113-118.
HOU J F, LIU P G, CAO T Y. Thermal characteristics and oxidation kinetics study of light crude oil during air injection process[J].
Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 113-118.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.04.018

轻质原油注空气热特征及氧化动力学研究

侯剑锋,刘鹏刚,曹廷义

(中国石化西南油气分公司采气二厂,四川 阆中 637400)

摘要:为深入分析油藏注空气过程中原油的氧化热行为,进一步发展注空气提高原油采收率技术,采用热重/微商热重—差热联用(TG/DTG-DTA)分析手段进行研究,并基于经典的Arrhenius动力学模型定量地表征原油化学组成和储层岩石对氧化活性影响的大小。原油在整个升温过程中经历了三个化学机理完全不同的反应:低温氧化、燃料沉积和高温氧化。在低温度区间原油氧化表现出一定的吸热现象。由于不同的碳烃组成,三组原油在各个反应区域表现出不同的质量损失速率,与单独原油相比,储层岩石的加入降低了原油低温和高温氧化活化能。研究表明:重质组分含量越高,原油低温氧化反应速率越大,所沉积的燃料越多,高温氧化阶段燃烧释放的热量越强;原油在高温阶段的活化能大于低温阶段,高含量的重质组分使氧化反应活化能增大;储层岩石的催化特性和比表面积作用降低原油氧化活化能,起到非均相催化氧化的效果。

关键词:轻质原油;热行为;动力学分析;原油四组分;岩石矿物

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Thermal characteristics and oxidation kinetics study of light crude oil during air injection process

HOU Jianfeng, LIU Penggang, CAO Tingyi

(No.2 Gas Production Plant, Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Langzhong, Sichuan 637400, China)

Abstract: In order to deeply analyze the thermal oxidation behavior of crude oil during air injection process in reservoir and further develop air injection enhance oil recovery technology, the TG/DTG-DTA analysis methods were used for study. Based on the classical Arrhenius kinetic model, the effects of oil chemical composition and reservoir rock on the oxidation activity of tested samples were quantitatively characterized. Crude oil undergoes three completely different chemical reactions during the whole heating process: low-temperature oxidation, fuel deposition and high-temperature oxidation. The oxidation of crude oil at low temperature shows a certain endothermic phenomena. Because of different hydrocarbon composition, crude oil with three samples added show different mass loss rates in each reaction area. Compared with that only contains crude oil, the addition of reservoir rocks reduces the activation energy of low temperature and high temperature oxidation. Researches show that: the higher the content of heavier components, the quicker the reaction of crude oil in LTO stage, the more fuel is deposited, and the higher the heat released from the combustion in HTO stage. The activation energy of crude oil in the high temperature stage is greater than that in the low temperature stage. High content of heavy components make the activation energy of oxidation reaction increase. The catalytic properties and specific surface area of reservoir rock reduce the activation energy of crude oil, playing an important role in the heterogeneous catalytic oxidation.

Key words: light crude oil, thermal behavior, kinetic analysis, SARA component, rock minerals

目前,高压注空气作为一种经济有效的二次或三次采油技术,在国内外多个油田进行了成功的商业化运用,特别是针对高温、高压、低渗透轻质油藏,空气驱具有很好的适应性^[1]。大量商用热分析技术

(TG/DTG、DTA、DSC和PDSC)已广泛用于高压注空气过程中原油热行为和氧化动力学的表征。

KÖK等^[2-3]采用热分析技术(TG/DTG、DTA、DSC)研究不同油藏原油的氧化热动力学行为,原油中沥

收稿日期:2019-07-19。

第一作者简介:侯剑锋(1989—),男,本科,工程师,从事天然气开采和党群管理工作。通讯地址:四川省阆中市七里开发区中石化科研办公基地,邮政编码:637400。E-mail:hj772645551@163.com

青质含量越高,氧化活化能越大,放热量越高,其他参数如升温速率、黏土矿物和金属添加剂对原油的氧化行为也具有重要影响。GUNDOGAR等^[4]报道了轻质与中质原油在空气中的氧化热行为,并用不同的动力学模型求取活化能,结果显示高温氧化阶段的活化能明显大于低温阶段,原油中重组分含量对氧化放热量和活化能有较大影响。LIU等^[5]使用热重分析方法探讨了原油化学组成对氧化动力学的影响,原油中胶质沥青质含量越高,其在低温氧化阶段的反应速率和能量需求越大,在燃料沉积阶段生成更多的含碳沉积物,这对高温燃烧是积极有利的。刘鹏刚等^[6]指出原油在低温氧化阶段一般呈现吸热趋势,有利的能量聚集对后续反应必不可少,吸热量与质量损失速率成正相关。张永刚等^[7]采用等温氧化实验研究不同温度和压力条件下红河轻质原油的氧化活性,温度越高,压力越大,低温氧化反应活化能越低。

尽管多年来国内外学者对高压注空气技术进行了广泛的研究与跟踪报道,但相应的基础理论和应用研究仍然存在着许多的空白与不足,如原油各化学组分在注空气氧化过程中所扮演的角色不明确,岩石矿物对原油热动力学行为的影响也少有报道,各油田油藏和地质条件的差异使得已有的规律可能并不适用于新疆油田。为此,以处于开采中期的新疆某低渗透轻质油藏为代表,系统地开展注空气过程中原油氧化热动力学研究,揭示出原油化学组成和储层岩石对原油氧化热行为及反应活性的影响,进一步发展注空气提高原油采收率技术,同时为新疆油田现场应用提供理论指导和施工依据。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

本次研究采用新疆某轻质油藏原油(目标原油),命名为原油-1,同时选取另外两种轻质原油,分别命名为原油-2和原油-3,采用四组分分离法和密度计等获取3种原油的组成及物性参数(表1)。通过把储层岩石压碎成80目左右的颗粒获得储层岩石颗粒,采用X射线衍射分析仪(型号为X'Pert Pro MPD)

测试得到其矿物组成(高岭石5.74%,蒙脱石3.61%,绿泥石1.39%,其他非黏土矿物89.26%)。测试仪器采用德国耐驰公司生产的同步综合热分析仪(型号为NETZSCH STA 409 PC/PG)。

1.2 热分析实验方法

将同步综合热分析仪调节为TG-DTA联用模式,为确保精度高,测试前用草酸钙水合物标定温度读数,并用银校正浮力效应。然后,分别加入3种原油进行测试,原油质量均为30 mg。对于原油-1+储层岩石热分析实验中,取原油-1质量为15 mg,储层岩石为15 mg,按质量比1:1混合均匀后进行测试。4组样品均在常压空气介质环境中进行测试,设定空气流量为50 mL/min,升温速率为10 °C/min,升温为25~650 °C。为确保结果准确性,每组实验测试两次。

2 原油氧化动力学理论

原油氧化热动力学理论是空气驱技术的研究重点,通过不同的假设,众多研究学者推导出大量的理论模型来获取原油氧化/燃烧动力学参数,如:活化能(E)、指前因子(A_r)和反应级数(n)等^[8-9]。在本次研究中,采用由KÖK提出的广泛使用且经典的Arrhenius热动力学模型来分析测试所获取的TG/DTG数据,方程形式如下:

$$\log\left(\frac{dW/dt}{W}\right) = \log A_r - \frac{E}{2.303RT} \quad (1)$$

式(1)中的变量参数已经在文献[10]中进行了详细描述。把 $\log(dW/dt/W)$ 与 $1/T$ 的数据点绘制在同一坐标轴上,通过线性拟合可获得一条直线,原油氧化的活化能(E)与指前因子(A_r)便可由直线的斜率和截距求得。

3 结果与讨论

3.1 原油TG/DTG/DTA测试分析

图1显示了目标原油(原油-1)在常压空气流环境下的热重曲线,质量损失速率在空气流作用下比

表1 原油组成及物性参数

Table 1 SARA composition and physical property parameter of crude oils

样品	饱和烃/%	芳香烃/%	胶质/%	沥青质/%	密度/(g·cm ⁻³)	黏度/(mPa·s)	API/(°)
原油-1	41.535	43.256	14.483	0.725	0.859	23.624	33.235
原油-2	47.326	41.308	10.872	0.492	0.857	21.517	33.617
原油-3	48.368	42.083	9.120	0.428	0.854	20.704	34.192

较快,温度上升到500℃时,损失程度达到94.5%左右。DTG曲线上反映出在整个升温过程中存在着3个化学机理完全不同的反应:低温氧化(LTO,温度为25~130℃)、燃料沉积(FD,温度为130~400℃)和高温氧化(HTO,温度为400~500℃),原油氧化温度区间范围及峰值温度见表2。

在低温氧化(LTO)阶段,氧气与液态碳烃化合物之间同时存在着各种各样的化学反应,并且这些化学反应可进一步划分为两大类:加氧反应和缩聚反应。在升温初期,环境温度低,氧原子以化学键的形式进入到极性的液态碳烃分子中形成酮、醛、酸、醇等过氧化物。随着环境温度持续升高,加氧反应形成的过氧产物可进一步聚合成重质组分,为后面的燃料沉积做准备。随着环境温度的进一步上升,低温氧化产物进入到燃料沉积(FD)过程。由于燃料是通过重质组分转化成低氢含量的含碳沉积物所形成的,根据Rice-Kossiakoff裂解理论,剧烈的放热也可以使油组分中的其他部分裂解成如烯烃等产物作为所沉积的燃料的基质^[9],因此,燃料沉积量和沉积速率对后续高温氧化能否成功进行至关重要。表2显示测试样品在燃料沉积阶段表现出较高的质量损失,这主要是因为原油中大量的轻烃等挥发性组分在低温氧化阶段未充分蒸发掉,导致燃料沉积过程中仍然有大量的轻质组分损失。在高温氧化(HTO)阶段,含碳沉积物较高的反应性以及不断上升的环境温度所提供的充足的热供应,形成的燃料经历一系列剧烈且复杂的燃烧放热反应,导致另一个快速

的质量损失的发生。由于目标原油为轻质原油,重质组分含量较低,燃料沉积阶段所形成的含碳沉积物也较少,导致高温氧化阶段持续时间不长,并在500℃左右结束燃烧。

DTA测试曲线显示原油在低温氧化阶段呈现出一定的吸热现象,这主要是由于轻质组分汽化蒸发的相变化以及原油与氧气之间产生的一系列加氧与裂解反应所致^[11]。在随后的燃料沉积过程的后半段,原油表现出了一定的放热能力,表明原油中重质组分碳化生焦的同时少量的焦炭也发生了燃烧。进入到高温氧化阶段,因为含碳沉积物碳氢比例高,具有较高的氧化活性,高温氧化成为了主要的放热阶段,为气驱采油提供最多的热量和必要的烟道气驱,剧烈的放热使得油藏注气过程中原油自燃成为可能。

3.2 原油化学组成对氧化热行为的影响

选取3种不同轻质原油为测试对象,研究不同化学组成对原油氧化热行为的影响,热重损失与热效应曲线见图2。DTG曲线显示,3组原油在整个升温过程中均表现出LTO、FD和HTO三个阶段,但由于原油具有不同的化学组成,使其在各个反应区域表现出不同的质量损失速率。在低温氧化阶段,原油-1表现出更大的温度区间,低温氧化的程度更高,利于形成更多的含氧化合物等中间产物。同时,在燃料沉积阶段,原油-1的质量损失速率最小,该阶段损失掉的原油组分较少,这有利于沉积更多的含碳残留物。原油-1含有最多的重质组分(表1),这是形成含碳沉积物(Coke)的主要来源。表2显示低温氧化和燃料沉积阶段,原油-1、原油-2和原油-3沉积的燃料分别为33.562%、20.540%和19.010%,原油-1生成了最多的含碳沉积物。相应的,在高温氧化阶段,其反应速率也最大。因此,轻质原油中重质组分含量越高,在低温氧化阶段反应速率越大,所沉积的燃料越多,越有利于原油高温氧化反应的持续进行。由于3组原油中沥青质含量差异较小,重质组分对原油氧化热行为的影响归因于胶质含量的差异。FASSIHI等^[12]指出在燃料沉积过程中,轻质油与重质油遵循着

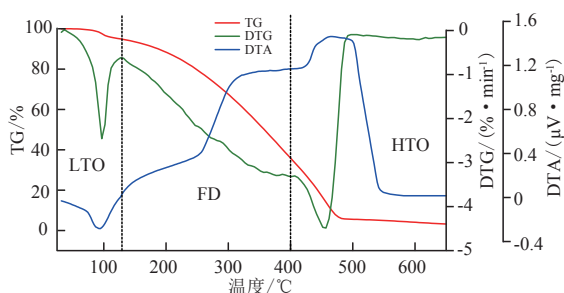


图1 原油在常压空气流测试环境下的TG/DTG/DTA曲线
Fig. 1 TG/DTG/DTA curves of crude oil in test environment with ambient air flow

表2 不同测试样品的反应温度区间和质量损失

Table 2 Temperature range and mass loss for different tested samples

样品	低温氧化(LTO)			燃料沉积(FD)		高温氧化(HTO)			燃尽 温度/°C
	温度/°C	峰值温度/°C	质量损失/%	温度/°C	质量损失/%	温度/°C	峰值温度/°C	质量损失/%	
原油-1	25 ~ 129	98	5.332	129 ~ 406	61.113	406 ~ 494	453	33.562	501
原油-2	25 ~ 125	74	13.401	125 ~ 409	66.061	409 ~ 516	462	20.540	517
原油-3	25 ~ 122	97	4.234	122 ~ 414	76.694	414 ~ 579	466	19.010	594
原油-1+储层岩石	25 ~ 162	132	4.741	162 ~ 397	33.730	397 ~ 476	433	16.512	527

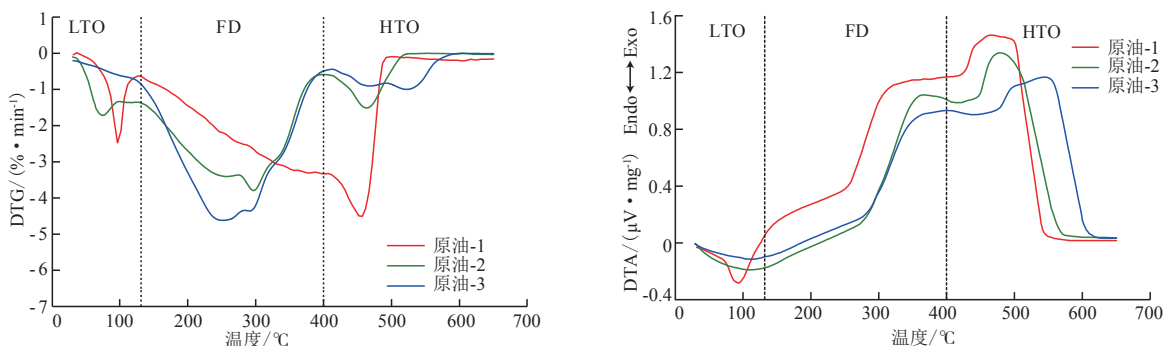


图2 不同原油在常压空气流测试环境下的热重损失与热流量曲线

相似的路径:油—胶质—沥青质/碳,胶质为燃料的形成提供必不可少的基质。PU等^[13]在研究不同原油氧化特征中指出,胶质和沥青质分子具有相似的结构单元,由于支链结构复杂,芳构化程度高,分子结构极性高,使得胶质在氧化过程中易受氧原子攻击。所测试的原油中胶质含量越高,氧化反应速率越快,生成的低氢含碳沉积物越多。

所测试的轻质原油的DTA曲线同样表现出3个明显的反应区间。伴随着挥发性组分蒸发引起的相态变化和碳氢组分的裂解,3组原油在LTO温度范围内呈现出吸热的趋势,这是因为原油需要经历一个有利的能量聚集过程为高效的低温氧化提供必要的热量。在HTO阶段,反应以断键燃烧为主,形成大量的碳氧化物和剧烈的热量释放。通过比较3组原油的DTG与DTA曲线可以发现,原油的LTO反应速率越快,所吸收的能量越高,相应的在HTO阶段燃烧释放的热量越多。这可能是因为原油-1含有最多的重质组分,在LTO阶段这些重质组分的裂解反应占据了主导地位,同时裂解反应是一个吸热过程,有利于形成更多的含碳沉积物,为HTO反应提供更多的燃料^[14]。因此,从DTA曲线上可以看出原油重度越小,

吸热与放热反应的峰值越大。

3.3 原油及原油+储层岩石热分析对比

原油-1和原油-1+储层岩石在常压空气流环境下的热重曲线如图3。与原油-1+储层岩石相比,原油-1的DTG曲线显示了非常高的质量损失速率,特别是在低温与高温氧化阶段质量损失速率差距较大。所加入的储层岩石是极度细小的矿物颗粒,具有较强的吸附能力,吸附在岩石颗粒表面的原油可减轻原油中易挥发性组分的蒸发,这是原油+储层岩石混合物质量损失程度较单独原油低的一大原因。此外,岩石矿物具有很强的热稳定性,在整个升温过程中不会被分解,也不参与反应。表2显示储层岩石的加入使得原油低温氧化温度区间和峰值温度均有不同程度的增加,利于碳氢组分与氧气充分进行低温氧化反应,并且更多的易挥发性组分被残留下来,形成更多的中间产物。类似的,原油+储层岩石的高温氧化阶段的温度区间也有所增加,但其达到最高质量损失速率(波谷)所需的温度比单独原油实验低。峰值温度越低表明燃料越容易燃烧,因此,储层岩石的加入使得高温氧化越容易进行。综合分析,储层岩石的

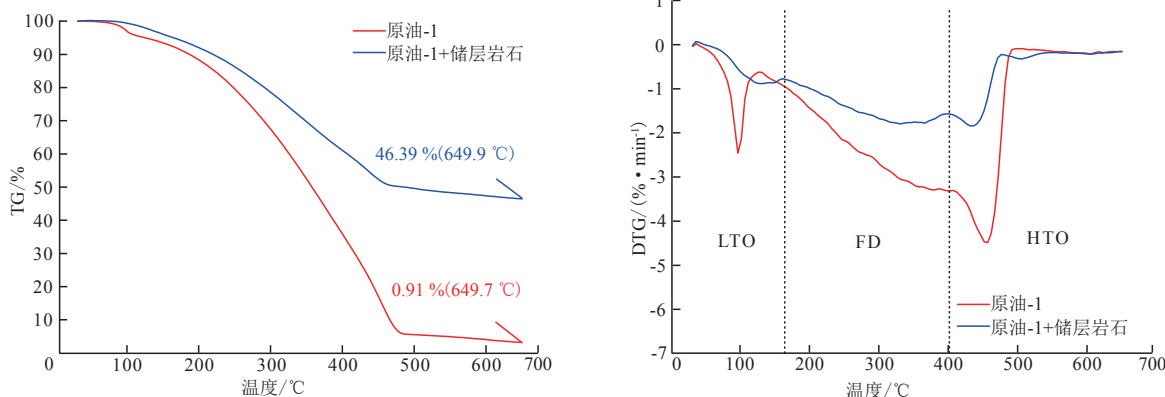


图3 原油和原油+储层岩石在常压测试环境下的热重损失曲线

Fig. 3 TG/DTG curves of crude oil and oil+reservoir cutting

存在对轻质油藏成功实施空气驱是积极有利的。

3.4 原油氧化动力学研究

各测试样品在低温氧化和高温氧化阶段的活化能及指前因子通过经典的阿伦纽斯方法计算得到,根据热重数据作出图版如图4所示,具体计算结果见表3。表3显示测试样品在不同的温度区间具有不同的活化能,一般而言,活化能是一个反映不同复杂的反应和氧化化学机理的表观值。所有测试样品在高温氧化阶段的活化能明显大于低温氧化阶段,这主要是由于胶质、沥青质等重质组分的质量损失主要发生在高温阶段,而饱和烃、芳香烃等轻质组分的氧化发生在低温阶段,重质组分由于其稳定的分子结构和较强的抗氧化性使得其发生氧化反应所需要的能量明显高于轻质组分,因此测试样品在高温阶段的活化能大于低温阶段。由表3可以看出,3组原油在低温氧化和高温氧化阶段的活化能相对大小为:原油-1>原油-2>原油-3。原油的重质组分含量从大到小依次为:原油-1(15.218%)>原油-2(11.364%)>原油-3(9.548%)。3组原油在整个升

温过程中的氧化反应活性的大小顺序与重质组分含量大小具有一定规律性,即:重质组分含量越高,原油反应活化能越大,氧化活性减弱。

原油-1在低温氧化和高温氧化阶段的活化能分别为48.952 kJ/mol和87.991 kJ/mol,加入储层岩石后两个阶段的活化能分别减少为28.363 kJ/mol和58.621 kJ/mol。活化能越低意味着用更少的能量便可使反应物被活化,开启氧化反应通道。因此,储层岩石的加入有利于降低原油在氧化过程所必须的外部能量供给,使反应更容易进行,这可能是由于储层岩石中的黏土矿物在氧化过程中起到催化作用。此外,岩石颗粒所提供的比表面积加速了氧气与原油接触,起到非均相催化氧化的效果。

4 结论

1) 在整个升温过程中,原油经历了3个化学机理完全不同的反应过程:低温氧化、燃料沉积和高温氧化。DTA曲线在低温度区间表现出一定的吸热现象,原油需要经历一个有利的能量聚集过程为高效

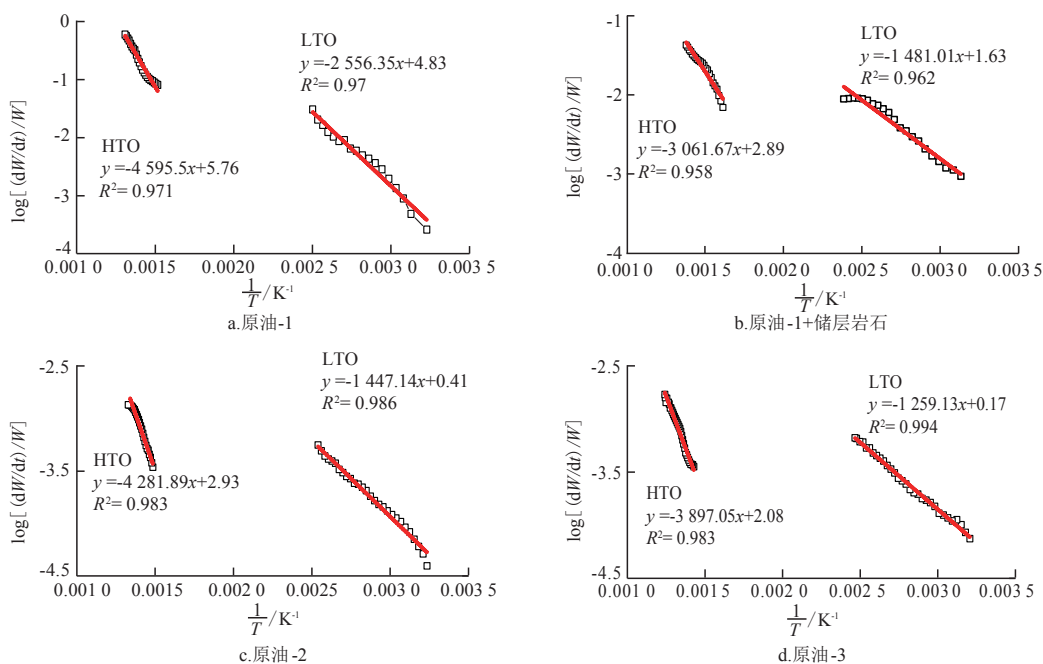


图4 不同测试样品的氧化热力学参数阿伦纽斯计算曲线
Fig. 4 Kinetic parameters calculation of tested samples by Arrhenius method

表3 测试样品的氧化热力学参数
Table 3 Oxidation kinetic parameters of tested samples

样品	线性拟合斜率		活化能/(kJ·mol ⁻¹)		指前因子/min	
	LTO	HTO	LTO	HTO	LTO	HTO
原油-1	-2 556.352	-4 595.501	48.952	87.991	67 601	575 004
原油-2	-1 447.140	-4 281.890	27.710	81.990	2.572	851.140
原油-2	-1 259.130	-3 897.054	24.114	74.623	1.480	120.235
原油-1+储层岩石	-1 481.016	-3 061.673	28.363	58.621	42.650	776.240

的低温氧化提供必要的热量。

2) 轻质原油中重质组分含量越高,在低温氧化阶段反应速率越大,所沉积的燃料越多,高温氧化阶段燃烧释放的热量越多。储层岩石使原油低温氧化温度区间和峰值温度增加,利于碳氢组分与氧气充分进行低温氧化反应,形成更多的中间产物,同时降低高温氧化峰值温度,使反应越容易进行。

3) 重质组分稳定的分子结构和较强的抗氧化性使得其发生氧化反应所需要的能量明显高于轻质组分,测试样品在高温阶段的活化能大于低温阶段。原油中重质组分含量越高,氧化反应活化能越大。

4) 储层岩石的催化特性降低了原油在低温和高温氧化过程所必须的外部能量供给,使反应物更容易被活化而开启氧化反应通道,同时岩石颗粒所提供的比表面积加速了氧气与原油接触,起到非均相催化氧化的效果。

参考文献

- [1] 蒲万芬,袁成东,金发扬,等.轻质油藏高压注空气技术应用前景分析[J].科技导报,2013,31(17):72-79.
PU W F, YUAN C D, JIN F Y, et al. High pressure air injection technique for light oil reservoir: Its development history and application prospect[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(17): 72-79.
- [2] KÖK M V. Characterization of medium and heavy crude oils using thermal analysis techniques[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(5): 1026-1031.
- [3] KÖK M V. Thermal behavior and kinetics of crude oils at low heating rates by differential scanning calorimeter[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 96(12): 123-127.
- [4] GUNDOGAR A S, KÖK M V. Thermal characterization, combustion and kinetics of different origin crude oils[J]. Fuel, 2014, 123(2): 59-65.
- [5] LIU P G, PU W F, NI J H, et al. Thermal investigation on crude oil oxidation kinetics through TG/DTG and DTA tests[J]. Petroleum Science and Technology, 2016, 34(7): 685-692.
- [6] 刘鹏刚,蒲万芬,贾虎,等.岩屑存在下油藏注空气原油的氧化热解分析[J].燃烧科学与技术,2015,21(5):464-470.
LIU P G, PU W F, JIA H, et al. Oil oxidation pyrolysis analysis of oil reservoir air injection in the presence of cutting[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(5): 464-470.
- [7] 张永刚,罗懿,刘岳龙,等.红河油田轻质原油低温氧化实验及动力学研究[J].油气藏评价与开发,2013,3(6):43-47.
ZHANG Y G, LUO Y, LIU Y L, et al. LTO experiment and kinetics analysis of light crude in Honghe oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(6): 43-47.
- [8] FAN C, ZAN C, ZHANG Q, et al. The oxidation of heavy oil: thermogravimetric analysis and non-isothermal kinetics using the distributed activation energy model[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 119(6): 146-150.
- [9] KÖK M V, ACAR C. Kinetics of crude oil combustion[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2006, 83(2): 445-449.
- [10] GREENSFELDER B S, VOGEL H H, GOOD G M. Catalytic and thermal cracking of pure hydrocarbons: mechanisms of reaction[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1949, 41(11): 2573-2584.
- [11] MOTHÉ M G, CARVALHO C H M, SÉRVULO E F C, et al. Kinetic study of heavy crude oils by thermal analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013, 111(11): 663-668.
- [12] FASSIHI M R, MEYERS K O, BASILE P F. Low-temperature oxidation of viscous crude oils[J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 5(4): 609-616.
- [13] PU W F, LIU P G, JIA H, et al. Comparative study of light and heavy oils oxidation using thermal analysis methods[J]. Petroleum Science and Technology, 2015, 13(33): 1357-1365.
- [14] NI J H, JIA H, PU W F, et al. Thermal kinetics study of light oil oxidation using TG/DTG techniques[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 117(3): 1349-1355.
- (编辑 徐佩)
-
- (上接第106页)
- 及其成因和意义[J].中国科学(B辑),1986,37(12):85-94.
DAI J X, QI H F, SONG Y, et al. Formation and significance of coalbed methane components and carbon isotopes in China[J]. Science in China(Series B), 1986, 37(12): 85-94.
- [28] FRANKS S G, DIAS R F, FREEMAN K H, et al. Carbon isotopic composition of organic acids in oil field waters, San Joaquin Basin, California, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(8):1301-1310.
- [29] 刘存革,李国蓉,朱传玲,等.塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石碳、氧、锶同位素地球化学特征[J].地球科学(中国地质大学学报),2008,33(3):377-386.
LIU C G, LI G R, ZHU C L, et al. Geochemistry Characteristics of Carbon,Oxygen and Strontium Isotopes of Calcites Filled in Karstic Fissure-Cave in Lower-Middle Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(3): 377-386.
- [30] 宋土顺,马锋,刘立,等.大庆长垣扶余油层砂岩中方解石胶结物的碳、氧同位素特征及其成因[J].石油与天然气地质,2015,36(2):255-261.
SONG T S, MA F, LIU L, et al. Features and genesis of carbon-oxygen isotopes in calcite cement in sandstone in oil-bearing Fuyu layer of Daqing Placanticline[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 255-261.
- [31] 陈强,张慧元,李文厚,等.鄂尔多斯奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素特征及其意义[J].古地理学报,2012,14(1):117-124.
CHEN Q, ZHANG H Y, LI W H, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of the Ordovician carbonate rocks in Ordos and their implication[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 117-124.
- [32] SHACKLETON N J, KENNETT J P. Paleotemperature history of the cenozoic and the initiation of Antarctic glaciation: Oxygen and carbon isotope analysis in DSDP sites 277, 279 and 281[C]. In: kennett I P, et al. Initial reports of the DSDP 29, washington D C, US Government Printing Office, 1975: 743-755.
- [33] 张顺存,郭建钢,刘巍,等.克百断裂下盘二叠系砂砾岩中碳酸盐胶结物的氧、碳稳定同位素组成及形成环境分析[J].新疆地质,2009,27(4):359-363.
ZHANG S C, GUO J G, LIU W, et al. Carbon and oxygen stable isotopic composition of carbonate cementation in permian rudite of the footwall of kebai-fault[J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(4): 359-363.
- (编辑 黄颖)