



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2024.02.29.04

文章编号: 1674-5086(2024)04-0123-08

中图分类号: TE357

文献标志码: A

塔中深层稠油在不同氧含量下的动力学特征研究

周代余^{1,2,3*}, 杜 轩⁴, 杜虹宝^{1,2,3}, 闫更平^{1,2,3}, 罗 浩⁴

1. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆 库尔勒 841000; 3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆 库尔勒 841000; 4. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

摘 要: 原油在减氧空气中发生氧化反应的过程复杂, 准确分析油藏条件下原油氧化反应动力学特征十分重要。为实现对油藏条件下原油氧化反应的准确分析, 需进行定性与定量综合研究。采用差示扫描量热法(DSC)、热重法(TG)等定性与定量测试方法, 综合研究塔中深层稠油在不同氧含量下的氧化机理、氧化放热、失重和动力学特征。DSC实验结果表明, 氧含量的提升对原油的氧化热效应促进明显, 原油的氧化放热量与峰值热流量随着氧含量的升高而大幅增加。TG实验表明, 随着氧含量的升高, 原油的低温氧化区间不断缩短, 低温氧化阶段的质量消耗减少。低温氧化区间的温度范围随静态氧化时减氧空气中氧含量的升高(氧化程度的加深)而逐渐变窄。基于TG实验数据, 使用微分法Friedman和微分法OFW求取的原油低温氧化阶段活化能接近, 且活化能均随转化率的升高而增加, 塔中深层稠油在氧含量为5%的减氧空气中低温氧化阶段平均活化能为81.04 kJ/mol。

关键词: 原油氧化; 减氧空气; 动力学分析; 热效应; 氧化机理

A Study on the Kinetic Characteristics of Tazhong Deep Heavy Oil with Different Oxygen Contents

ZHOU Daiyu^{1,2,3*}, DU Xuan⁴, DU Hongbao^{1,2,3}, YAN Gengping^{1,2,3}, LUO Hao⁴

1. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 2. R & D Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Korla, Xinjiang 841000, China; 3. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla, Xinjiang 841000, China; 4. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: The oxidation process of crude oil in oxygen-reduced air is complex. In order to accurately analyze the oxidation reaction of crude oil under reservoir conditions, it is necessary to carry out comprehensive qualitative and quantitative studies. In order to further explore the oxidation mechanism of crude oil in the process of deoxygenated air flooding, and to clarify its oxidation heat release, weight loss and kinetic characteristics, the thermal analysis experiment of Tazhong deep heavy oil reservoir in Tarim Oilfield is carried out. DSC results show that the increase of oxygen content significantly promotes the oxidation heat effect of crude oil, and the overall oxidation heat release and peak heat flow of crude oil increase greatly with the increase of oxygen content. TG experiments show that with the increase of oxygen content, the low temperature oxidation interval of crude oil keeps shortening, and the mass consumption in the low temperature oxidation stage is reduced. The temperature range of the low-temperature oxidation interval gradually narrows with the increase of oxygen content in the oxygen reduction air (the deepening of oxidation degree) during static oxidation. Based on the TG experiment data, the activation energy of crude oil in the low-temperature oxidation stage obtained with Friedman and OFW methods is close, and the activation energy increases with the increase of conversion rate. The average activation energy of crude oil used in the experiment in the low-temperature oxidation stage in oxygen reduced air with oxygen content of 5% is 81.04 kJ/mol.

Keywords: crude oil oxidation; oxygen-reduced air; kinetic analysis; thermic effect; oxidation mechanism

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20240710.0854.018>

周代余, 杜 轩, 杜虹宝, 等. 塔中深层稠油在不同氧含量下的动力学特征研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 123-130.

ZHOU Daiyu, DU Xuan, DU Hongbao, et al. A Study on the Kinetic Characteristics of Tazhong Deep Heavy Oil with Different Oxygen Contents[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(4): 123-130.

* 收稿日期: 2024-02-29 网络出版时间: 2024-07-13

通信作者: 周代余, E-mail: zdy-tlm@petrochina.com.cn

引言

在油藏注减氧空气驱油过程中,原油与减氧空气发生的氧化反应过程十分复杂,为实现对油藏条件下原油氧化反应的精确分析,需进行定性与定量手段的综合研究^[1-9]。通过热分析实验对原油氧化反应进行测试的方法精度较高,可对氧化过程中的放热、质量损失等氧化特征进行定量分析,被学者广泛认可与应用^[10-17]。Kok 等^[18-19]利用热重法(TG)和差示扫描量热法(DSC)研究了原油氧化特征以及动力学参数,并评价了原油黏度。Freitag 等^[20]通过 TG 和 DSC 实验分析了 3 种稠油和其四族组分的氧化特性。然而,目前已有的研究均集中于原油在空气中的氧化动力学研究,而对减氧空气中原油的动力学研究较少。

因此,本文将首先通过差示扫描量热法对原油在不同氧含量减氧空气下氧化放热特性进行分析,然后,使用热重法对不同升温速率、不同氧含量减氧空气氧化后的原油进行热重测试表征,最后,基于多升温速率 TG 测试数据,采用微分法 Friedman 和积分法 OFW 两种非模型动力学求解方法对原油在减氧空气中的低温氧化阶段反应活化能进行求解,避免单独采用微分法和积分法对动力学结果带来的误差影响。以此更加精确地对减氧空气中的氧化反应进行表征,揭示其反应的机理与控制因素。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验用油:塔里木油田塔中深层稠油油藏取样原油以及其使用不同氧含量减氧空气高温高压静态氧化后的稠油,原油物性参数如表 1 所示。

实验用气:氮气、空气(氧含量 21%)、减氧空气(初始氧含量分别为 5%、10%、15%,其余组分为氮气),实验室配制。

表 1 原油物性参数

Tab. 1 Physical parameters of crude oil

黏度(50 °C)/(mPa·s)	含量/%			
	饱和烃	芳香烃	胶质	沥青质
330	42.21	23.80	11.92	22.07

1.2 实验仪器

本文主要采用热重分析仪以及差示扫描量热仪进行实验,具体仪器型号如表 2 所示。

表 2 实验仪器

Tab. 2 Experimental equipment

仪器名称	型号	生产厂家
热重分析仪	TG209F3	德国 NETZSCH
差示扫描量热仪	DSC214	德国 NETZSCH

1.3 实验方法

1.3.1 DSC 实验

使用 DSC214 差示扫描量热仪,对原油进行氧化放热分析实验。实验流程如下

1) 使用之前向仪器中放入空坩埚校准并预热 1 d 后使用。

2) 在坩埚中称取 2 mg 油样并封装,采用不同初始氧含量的减氧空气为吹扫气,流量为 50 mL/min,保护气设置为氮气,流量为 20 mL/min,在 5 °C/min 线性升温速率下进行实验,实验温度为 30~600 °C。

3) 每组实验至少进行两次,确保其数据所呈现的规律可重复。

1.3.2 TG 实验

使用 TG209F3 热重分析仪,在不同影响因素下,对不同原油样品进行测试,并基于 TG 实验结果计算分析氧化动力学参数。测试流程如下

1) 使用之前对仪器进行校正并预热 1 d 后使用。

2) 设置升温测试温度为 30~800 °C,建立不同升温速率下的基线。

3) 在坩埚中称取 2 mg 油样,采用不同氧含量的减氧空气作为吹扫气,流量为 50 mL/min,保护气设置为氮气,流量为 20 mL/min,在不同线性升温速率下进行实验。

4) 每组实验至少进行两次,确保其数据所呈现的规律可重复。

2 实验结果与分析

2.1 原油 DSC 分析

在 5%、10%、15%、21% 共 4 个初始氧含量下进行升温 DSC 测试,实验结果如图 1 所示。图 1 中所示 DSC 曲线为原油低温氧化放热的实时表征,由放热情况可以看出,整个氧化过程主要存在 3 个氧化放热区间,分别为低温氧化(LTO),燃料沉积(FD)与高温氧化(HTO)。实验所使用原油的放热偏后,低温氧化阶段的放热集中在 300 °C 之后,低温氧化反应释放的总热量相比中高温阶段

放热较少,原油放热集中在高温氧化阶段。该原油的饱和烃与芳香烃含量相对较少,重质组分较多,这也导致原油在低温氧化阶段放热较少,而当反应进入到高温氧化阶段后,原油的放热量迅速上升,在不同氧含量减氧空气中的峰值放热量达到了 11.1~27.4 mW/mg,原油高温氧化产生了大量热量,高温氧化阶段的放热效果优异。

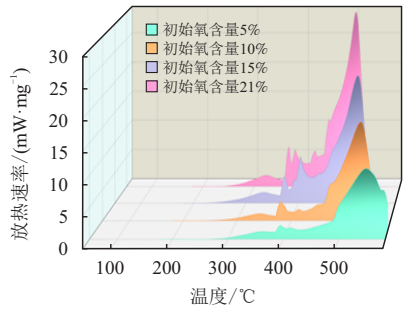


图 1 原油在不同初始氧含量减氧空气中氧化 DSC 曲线
Fig. 1 Oxidation of crude oil in deoxygenated air with different oxygen levels

同时,从实验结果中可以看出,不同氧含量对原油的氧化放热影响较大。随着减氧空气氧含量的升高,原油的低温氧化温度区间不断缩短,可释放大热量的高温氧化区间前移。在氧化区间改变的同时,原油整体的氧化放热量与峰值放热量随着氧含量的升高而大幅增加。

2.2 原油 TG 分析

2.2.1 不同升温速率原油 TG

原油与氧含量为 5% 的减氧空气,在 3 种升温速率下的 TG-DTG 曲线如图 2 所示。基于 TG-DTG 曲线,可以将原油的氧化反应划分为低温氧化、燃料沉积和高温氧化 3 个连续温度区间,具体的划分参数如表 3 所示。

在整个升温 TG 测试过程中,质量损失随温度升高而下降,DTG(质量损失速率)曲线呈波动变化,反映了原油在不同氧化时期反应速率不同。在不同升温速率下,原油的氧化区间有所变化,当升温速率为 10 °C/min 时,该原油的低温氧化、燃料沉积与高温氧化区间分别为 [30, 390) °C、[390, 455) °C 和 [455, 671] °C,在氧化过程中,3 个氧化区间的截止温度均随着升温速率的增大而后移,这是因为升温速率的变化使得热滞后效应更加明显。同时,随着升温速率的增加,原油在低温氧化阶段的截止温度逐步后移,区间逐渐拓宽。质量损失方面,各温度对应的质量消耗速率有较大变化,体现在 DTG 曲线上为明显的波峰与波谷。在油藏温度 115 °C 下,不同升温速率下 DTG 在 -1.05 %/min~-2.43 %/min,反映了原油在油藏温度下的质量损失较快。在升温速率为 10 °C/min 时,原油大部分的质量损失集中在了低温氧化阶段,其质量损失达到了 61.54 %,并且随着升温速率的提升,原油在低温阶段的总质量损失减少,如表 3 所示。

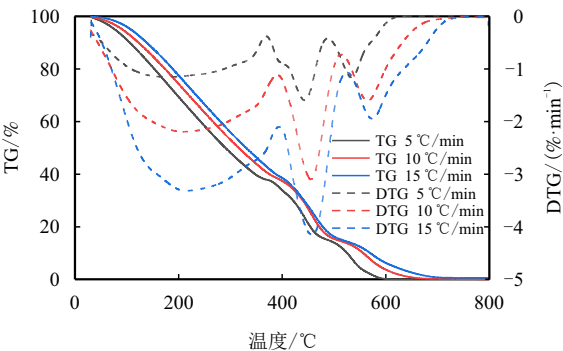


图 2 原油在不同升温速率下的 TG-DTG 曲线
Fig. 2 TG-DTG curves of crude oil at different heating rates

表 3 不同升温速率下原油的反应区域和质量损失
Tab. 3 Reaction area and mass loss of crude oil at different heating rates

升温速率/(°C·min ⁻¹)	温度/°C			质量损失/%		
	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)
5	30~368	368~443	443~602	62.02	14.38	23.60
10	30~390	390~455	455~671	61.54	13.30	25.16
15	30~393	393~458	458~701	60.67	13.56	25.77

2.2.2 不同氧含量原油 TG

原油在不同氧含量下 TG 测试结果如图 3 与表 4 所示。由实验结果可以看出,在原油氧化过程中,减氧空气氧含量的改变会对原油的失重特征产生一定影响。随着氧含量的升高,原油的低温氧化区间不断缩短,低温阶段的质量消耗减少,反应整

体向高温氧化阶段偏移。在较高氧含量下,氛围气中的氧分子更容易与原油接触,增加了氧化反应的速率,使得更多可以挥发的轻质组分通过加氧反应进行转化,导致了低温氧化阶段原油蒸馏挥发的减少以及中高温氧化两个耗氧速率较大的反应区间不断前移,在更低的温度下结束低温氧化,进入到下

一个氧化阶段。这一氧化反应特性对应到宏观的驱油过程中,反映了原油的氧化模式受氧含量的影响,在氧含量较高的情况下更倾向于转换反应模式,提前进入中高温氧化阶段。

采用初始氧含量为 5%、10%、15% 的减氧空气和空气,设置升温速率分别为 5, 10 和 15 °C/min

进行实验,对不同初始氧含量下多升温速率实验中原油的热重损失特征进行分析,实验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,减氧空气的氧含量与升温速率均会对原油失重特征产生影响,在不同氧含量下,原油的氧化区间以及各区间中产生的质量损耗出现了明显的偏移。

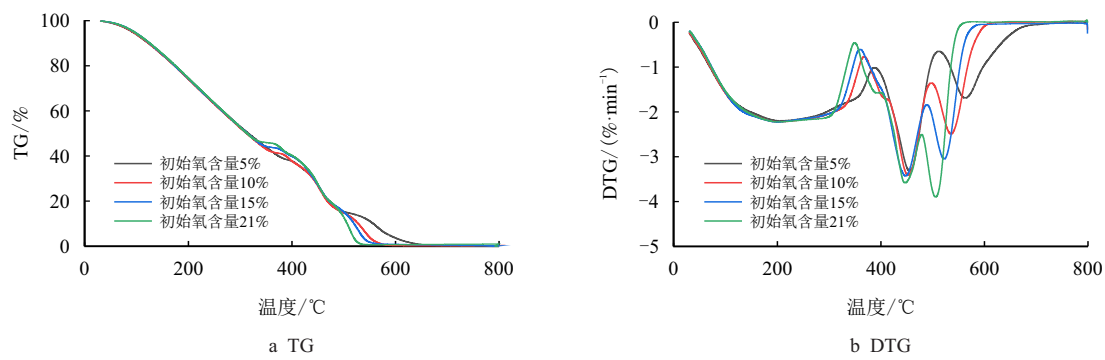


图 3 原油在不同初始氧含量下 TG 与 DTG 曲线
Fig. 3 TG and DTG curve of crude oil with different oxygen content

表 4 不同初始氧含量下原油的氧化区间与质量损失变化

Tab. 4 Changes in oxidation interval and mass loss of crude oil with different oxygen contents

氧含量/%	温度/°C			质量损失/%		
	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)
5	30~390	390~455	455~671	61.54	13.30	25.16
10	30~367	367~450	450~635	57.85	15.12	27.03
15	30~361	361~446	446~602	56.17	15.66	28.17
21	30~343	343~442	442~543	53.81	15.56	30.63

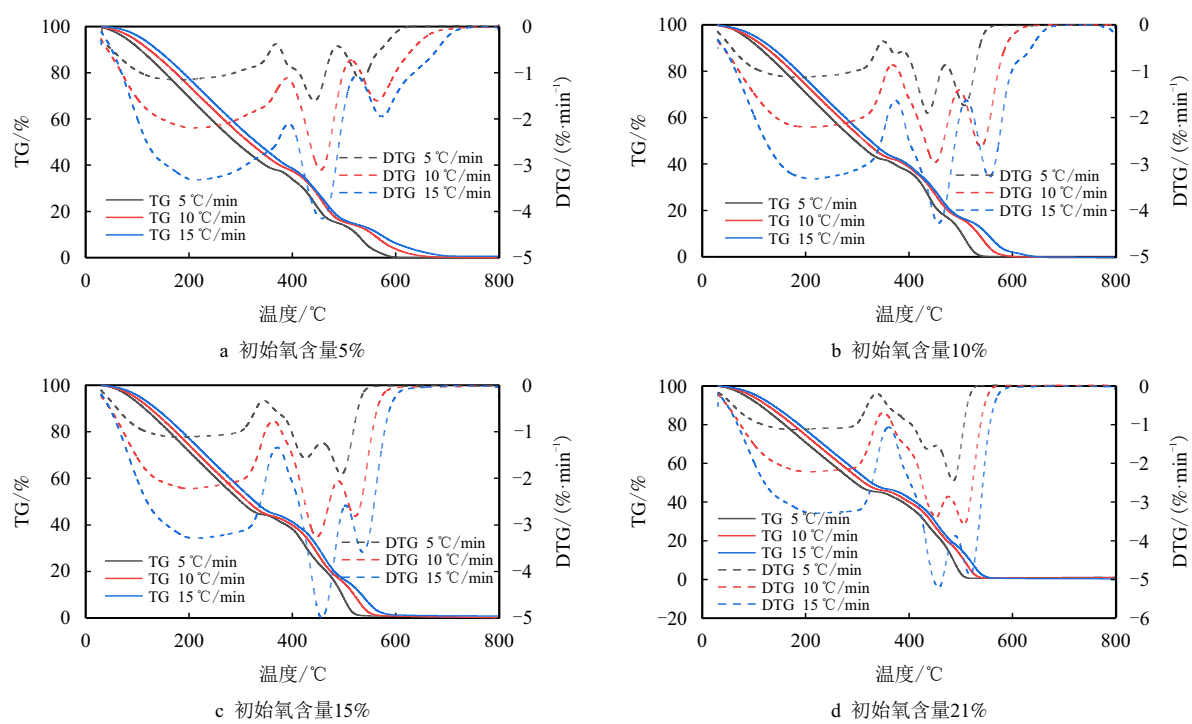


图 4 不同初始氧含量下多升温速率 TG-DTG 曲线
Fig. 4 TG-DTG curve of multiple heating rate with different oxygen content

不同初始氧含量与升温速率下原油各氧化区间变化如图5所示,在升温氧化TG测试中,随着氧含量的增加,不同升温速率下原油的低温氧化温度区间与高温氧化温度区间均逐步缩短,质量损失速率趋近于0时对应温度逐渐降低,原油在各个阶段的氧化反应速率逐渐提升。在低温氧化阶段,减氧空气中氧含

量的升高促进了原油的加氧反应,造成了低温氧化区间的烃类挥发减少,并且使得原油中的氧化衍生物占比更大,原油更加倾向于进入到中高温氧化阶段;在高温氧化阶段时,随着氧含量的升高,高温氧化温度区间逐渐缩短,反映了其高温氧化速率更高,原油消耗速率更快,原油整体氧化温度区间更小。

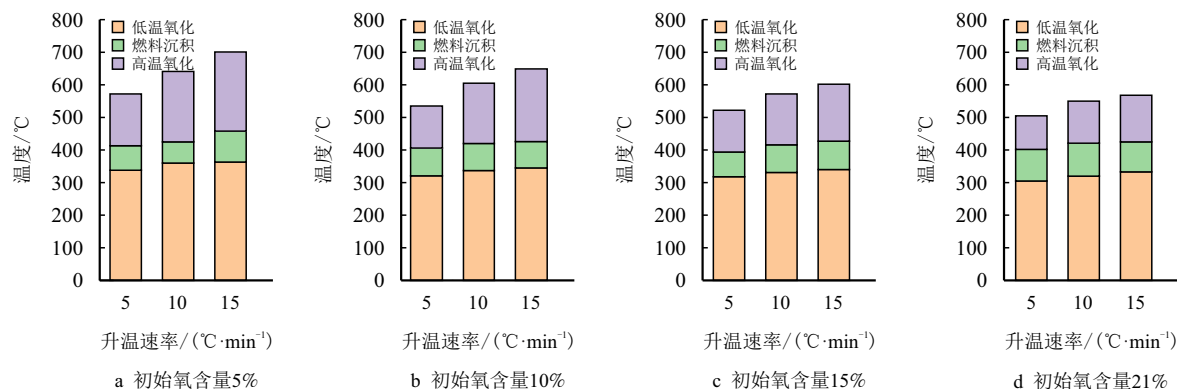


图5 不同初始氧含量与升温速率下原油氧化区间变化

Fig. 5 Variation of oxidation interval of crude oil with different oxygen content and heating rate

将不同初始氧含量与升温速率下原油低温氧化阶段产生的质量损失进行曲面拟合,结果见图6。

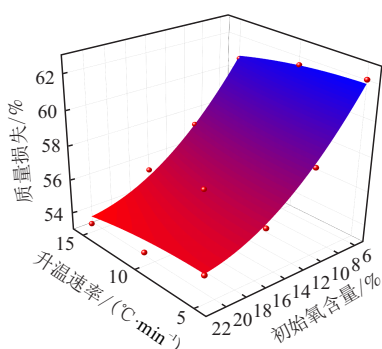
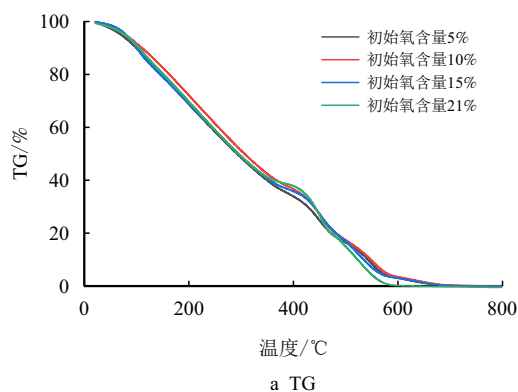


图6 不同初始氧含量与升温速率下原油低温氧化阶段质量损失

Fig. 6 Mass loss of crude oil in low temperature oxidation stage with different oxygen content and heating rate



从图6可以看出,氧含量的变化会对原油在低温氧化区间的质量损耗产生明显影响。随着氧含量的升高,易于发生氧化反应的轻质烃类更多地参与到了氧化反应中,进而转化生成了更多难以挥发的大分子物质,抑制了轻质烃类的挥发失重。使得原油在低温氧化阶段的质量损失逐渐减少,在高温氧化阶段产生的质量损失逐渐增多,原油氧化过程中质量消耗的主要区间逐渐向高温阶段偏移。

2.2.3 不同减氧空气氧化后原油 TG

采用原油经不同初始氧含量减氧空气高温高压静态氧化10 d后产出油样进行TG测试情况如图7所示。

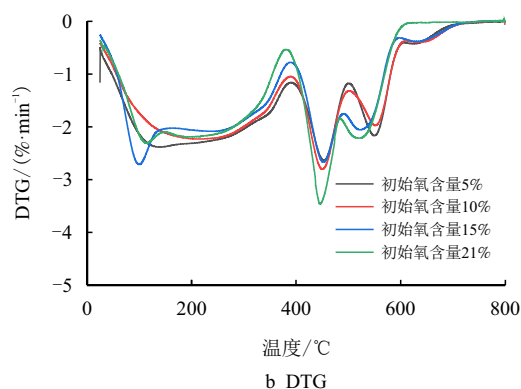


图7 原油与不同初始氧含量减氧空气氧化产出油 TG 和 DTG 曲线

Fig. 7 TG and DTG curves of crude oil and deoxygenated air oxidation with different oxygen contents

原油在氧化后依然保持着 3 个氧化区间,且低温氧化区间的大小随氧含量的升高(氧化程度的加深)变化,氧含量较高时,低温氧化区间相对较窄,反映了原油因氧化反应产生的重质组分随氧含量增加而增多,从而更倾向于进入高温氧化反应阶段。与此同时,原油在氧化后的失重特征也发生了明显变化。当氧含量较高为 15% 和 21% 时,氧化程度

较深,原油在 100 °C 附近出现了明显的失重区域,反映在 DTG 曲线上为一段下降峰,推测为静态氧化过程中碳键剥离反应所生成水的挥发导致。此外,在反应后期氧化后原油质量耗尽的温度发生明显后移,如表 5 所示,氧化反应生成了一些低温无法分解的重质物质,使得原油需要更高的温度才能耗尽。

表 5 不同氧化油的反应区域和质量损失变化
Tab. 5 The variation of reaction zone and mass loss of different oxidized oils

初始氧含量/%	温度/°C			质量损失/%		
	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)	低温氧化(LTO)	燃料沉积(FD)
5	30~391	391~452	452~730	64.11	11.55	24.34
10	30~389	389~449	449~721	61.11	11.75	27.14
15	30~388	388~451	451~716	62.26	10.56	27.18
21	30~381	381~446	446~614	60.58	10.52	28.90

2.3 原油动力学分析

由于在减氧空气中原油较难通过氧化放热推动反应达到高温氧化阶段,因此,本文基于上文中不同升温速率 TG 数据,使用微分法 Friedman 和积分法 OFW 对原油低温氧化阶段的动力学参数进行求解。原油在氧含量为 5% 的减氧空气中低温氧化阶段活化能随转化率($\alpha=0.1\sim0.9$)的变化关系如图 8 所示。

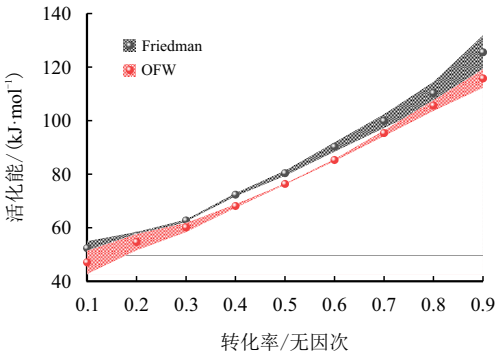


图 8 原油低温氧化阶段活化能随转化率的变化关系

Fig. 8 The relationship between activation energy and conversion of crude oil at low temperature oxidation stage

由实验结果可得,使用微分法 Friedman 和积分法 OFW 计算活化能时存在的差别较小,且活化能的变化趋势趋同,证明了该动力学参数计算结果的可靠性。在参与计算的温度区间内,原油在整个低温氧化阶段,活化能随转化率的增加而增大,随着转化率的增加,低温氧化进程不断深入,前期生成的各种氧化衍生物会继续经历脱烷基、芳构缩合和缩聚等断键过程,需要较高的能量,原油中反应物分子发生反应所需达到的临界能量升高,反应发生

的难度随原油转化的进行而逐渐增大。因而活化能呈增大趋势。综合两种模型方法计算结果,在低温氧化阶段的转化过程中,在计算区间内,原油的平均反应活化能为 81.04 kJ/mol。

3 结 论

1) 整个氧化过程主要存在低温氧化,燃料沉积与高温氧化 3 个氧化放热区间,塔中深层稠油的放热集中在温度较高的区间内,低温阶段放热不明显。氧含量的提升对原油的氧化热效应促进明显,原油整体的氧化放热量与峰值热流量随着氧含量的升高而大幅增加。

2) 随着氧含量的升高,原油在低温氧化阶段的质量损失逐渐减少,在高温氧化阶段产生的质量损失逐渐增多,原油氧化过程中质量消耗的主要区间逐渐向高温阶段偏移。

3) 使用不同氧含量减氧空气氧化后原油进行升温 TG 实验时,原油在氧化后依然保持着 3 个氧化区间,且低温氧化区间的大小随氧化时减氧空气中氧含量的升高而变化,经氧含量较高减氧空气氧化后,低温氧化区间相对较窄。同时,在 100 °C 附近 DTG 曲线有着明显波动,证明原油发生碳键剥离反应生成的水对失重特征产生了影响。

4) 使用 Friedman 和 OFW 两种方法求取的原油低温氧化阶段活化能接近,且活化能均随转化率的升高而增加,塔中深层稠油在氧含量为 5% 的减氧空气中低温氧化阶段平均活化能为 81.04 kJ/mol。

参考文献

- [1] 王玉婷, 邓君宇, 刘延民, 等. 轻质油藏注空气过程中原油低温氧化反应的 O_2 - CO_2 转换率[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(26): 50-54, 71. doi: 10.3969/j.issn.-16711815.2014.26.010
WANG Yuting, DENG Junyu, LIU Yanmin, et al. Oxygen-carbon dioxide conversion ratio in air-light oil low temperature oxidation process[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(26): 50-54, 71. doi: 10.3969/j.issn.-1671-1815.2014.26.010
- [2] 王云飞, 魏建光. 减氧空气与轻质原油低温氧化反应特征[J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 207-213. doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.2022.0181
WANG Yunfei, WEI Jianguang. Reaction characteristics of low temperature oxidation of light crude oil with dis-oxidation air[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 207-213. doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.-2022.0181
- [3] 齐桓, 李宜强, 陈小龙, 等. 轻质原油减氧空气驱低温氧化特征[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1210-1217. doi: 10.11698/PED.2021.06.12
QI Heng, LI Yiqiang, CHEN Xiaolong, et al. Low-temperature oxidation of light crude oil in oxygen-reduced air flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1210-1217. doi: 10.11698/PED.2021.06.12
- [4] 赵帅, 蒲万芬, 冯天, 等. 超稠油低温氧化和裂解成焦实验[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3): 69-75. doi: 10.-3969/j.issn.1006-6535.2022.03.010
ZHAO Shuai, PU Wanfen, FENG Tian, et al. Experiments on low-temperature oxidation, pyrolysis and coking of super-heavy oil[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(3): 69-75. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2022.03.010
- [5] 滕卫卫, 吴庆祥, 胡晓蝶, 等. 低渗透油藏空气驱原油氧化机理实验[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3): 104-111. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2022.03.015
TENG Weiwei, WU Qingxiang, HU Xiaodie, et al. Experiment on oxidation mechanism of crude oil by air flooding in low-permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(3): 104-111. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2022.03.015
- [6] 户昶昊. 火驱高温与低温氧化转换界限研究[J]. 特种油气藏, 2021, 28(5): 86-92. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2021.05.012
HU Changhao. Study on transform boundary of high-temperntwe and low-temperature oxidation in in-situ combustion[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(5): 86-92. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2021.05.012
- [7] SHOKOYA O, MEHTA S, MOORE R G, et al. Does miscibility of in situ generated flue gases with light crude oils contribute to oil recovery under high pressure air injection[C]. PETSOC-2001-019, 2001. doi: 10.2118/2001-019
- [8] MURUGAN P, MAHINPEY N, MANI T, et al. Effect of low-temperature oxidation on the pyrolysis and combustion of whole oil[J]. Energy, 2010, 35(5): 2317-2322. doi: 10.1016/j.energy.2010.02.022
- [9] NIU Baolun, REN Shaoran, LIU Yinhua, et al. Low-temperature oxidation of oil components in an air injection process for improved oil recovery[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(10): 4299-4304. doi: 10.1021/ef200891u
- [10] 唐君实, 关文龙, 梁金中, 等. 热重分析仪求取稠油高温氧化动力学参数[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 775-779. doi: 10.7623/syxb201304020
TANG Junshi, GUAN Wenlong, LIANG Jinzhong, et al. Determination on high-temperature oxidation kinetic parameters of heavy oils with thermogravimetric analyzer[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 775-779. doi: 10.7623/syxb201304020
- [11] 何勇, 陈建标, 户昶昊, 等. N_2 和 CO_2 气氛下辽河稠油热解过程及产物性质[J]. 石油学报(石油加工), 2019, 35(1): 128-135. doi: 10.3969/j.issn.1001-8719.-2019.01.016
HE Yong, CHEN Jianbiao, HU Changhao, et al. Pyrolysis process and product properties of liaohe heavy oil under N_2 and CO_2 atmosphere[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2019, 35(1): 128-135. doi: 10.-3969/j.issn.1001-8719.2019.01.016
- [12] 蒲万芬, 王亮亮, 彭小强, 等. 稠油低温氧化特性及行为研究[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(4): 41-46. doi: 10.3969/j.issn.2095-1426.2019.04.008
PU Wanfen, WANG Liangliang, PENG Xiaoqiang, et al. Study on characteristics and behaviors of low temperature oxidation of heavy crude oil[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(4): 41-46. doi: 10.3969/j.issn.-2095-1426.2019.04.008
- [13] 侯胜明, 刘印华, 于洪敏, 等. 注空气过程轻质原油低温氧化动力学[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 169-173. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.-2011.01.034
HOU Shengming, LIU Yinhua, YU Hongmin, et al. Kinetics of low temperature oxidation of light oil in air injection process[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(1): 169-173. doi: 10.-3969/j.issn.1673-5005.2011.01.034
- [14] 王杰祥, 夏金娜, 刘双龙, 等. 轻质原油低温氧化动

力学研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 105–107. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2013.01.028

WANG Jiexiang, XIA Jinna, LIU Shuanglong, et al. Study on kinetics of light oil under low temperature oxidation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 105–107. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2013.01.028

- [15] 张弦, 王海涛, 车洪昌. 稠油火烧油层高温氧化动力学参数计算与分析[J]. 非常规油气, 2021, 8(4): 36–42, 92. doi: 10.19901/j.fcgyq.2021.04.05

ZHANG Xian, WANG Haitao, CHE Hongchang. Calculation and analysis of kinetic parameters of heavy oil high temperature oxidation during in situ combustion[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(4): 36–42, 92. doi: 10.19901/j.fcgyq.2021.04.05

- [16] YUAN C, DMITRII A E, MIKHAIL A V. Oxidation behavior and kinetics of light, medium and heavy crude oils characterized by thermogravimetry coupled with Fourier-transform infrared spectroscopy (TG-FTIR)[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(4): 5571–5580. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b00428

- [17] LI J, MEHTA S A, MOORE R G, et al. Investigation of the oxidation behaviour of pure hydrocarbon components and crude oils utilizing PDSC thermal technique[J]. The Journal of Canadian Petroleum Technology, 2006, 45(1): 48–53. doi: 10.2118/06-01-04

- [18] KOK M V. Thermo-oxidative reactions of crude oils[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2010, 105(2): 411–414. doi: 10.1007/s10973-010-1117-x

- [19] KOK M V, KESKIN C. Comparative combustion kinetics for in situ combustion process[J]. Thermochimica Acta, 2001, 369(1–2): 143–147. doi: 10.1016/s00406031(00)00765-6

- [20] FREITAG N P, VERKOCZY B. Low-temperature oxidation of oils in terms of SARA fractions: Why simple reaction models don't work[J]. The Journal of Canadian Petroleum Technology, 2005, 44(3): 54–61. doi: 10.2118/2003-176

作者简介



周代余, 1973 年生, 男, 汉族, 重庆铜梁人, 高级工程师, 博士, 主要从事油气田开发和提高采收率方面的研究。E-mail: zdy-tlm@petrochina.com.cn



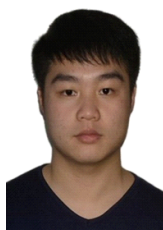
杜 轩, 1998 年生, 男, 汉族, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 主要从事油气藏提高采收率方面的研究。E-mail: 1779708680@qq.com



杜虹宝, 1989 年生, 男, 汉族, 黑龙江鹤岗人, 高级工程师, 硕士, 主要从事碎屑岩非烃类气驱提高采收率研究。E-mail: duhb-tlm@petrochina.com.cn



闫更平, 1985 年生, 男, 汉族, 山东潍坊人, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气田开发方面的研究工作。E-mail: ygping-tlm@petrochina.com.cn



罗 浩, 2000 年生, 男, 汉族, 四川大竹人, 硕士研究生, 主要从事油气藏提高采收率方面的研究工作。E-mail: 1127438448.con@qq.com

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>