

稠油低温氧化特性及行为研究

蒲万芬¹,王亮亮¹,彭小强²,任豪²,杨洋²,赵帅¹

(1.西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室,四川成都 610500;

2.中国石油新疆油田分公司实验检测研究院,新疆克拉玛依 834000)

摘要:针对新疆J区块稠油开展了恒温静态氧化管实验,通过分析氧化后产出气及原油组分的变化来研究温度、压力、石英砂和岩屑对稠油低温氧化特性的影响。实验结果表明:相比70℃,稠油在110℃条件下的平均耗氧速率增加了1.42%/d;压力从10 MPa增加至30 MPa时,CO+CO₂生成量增加了2.13%;石英砂和岩屑均能促进稠油氧化反应进程;与原油相比,加入石英砂和岩屑后耗氧量分别增加了1.71%和4.08%;岩屑对稠油低温氧化反应的促进作用主要来自岩屑的催化作用。采用TG-DSC同步热分析仪研究了原油氧化行为,并通过Arrhenius氧化动力学模型计算了活化能。结果表明:稠油在低温氧化阶段具有较低的反应活性,该阶段活化能仅为18.09 kJ/mol,远低于燃料沉积和高温氧化阶段的活化能(84.58 kJ/mol和113.39 kJ/mol)。

关键词:稠油;低温氧化;耗氧速率;氧化动力学;活化能

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Study on characteristics and behaviors of low temperature oxidation of heavy crude oil

PU Wanfen¹, WANG Liangliang¹, PENG Xiaoqiang², REN Hao², YANG Yang², ZHAO Shuai¹

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Research Institute of Experimental and Detection, Petrochina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: The static isothermal oxidation tube experiments were carried out for heavy crude oil in J block of Xinjiang Oilfield. The effects of temperature, pressure, quartz sand and detritus on the low temperature oxidation (LTO) characteristics of heavy crude oil were investigated by analyzing the alterations in the produced gas and SARA (saturate, aromatic, resin and asphaltene) fractions of oxidized oil. The results showed that the average oxygen consumption rate of the crude oil was increased by 1.42 % per day at 110 °C relative to that at 70 °C. When the pressure was increased from 10 MPa to 30 MPa, the production of CO+CO₂ was increased by 2.13 %. Both quartz sand and detritus promoted oxidation reaction on the heavy oil. The oxygen consumption increased by 1.71 % and 4.08 % after the addition of quartz sand and detritus relative to the crude oil. The promotion of detritus on LTO reactions of heavy crude oil mainly derived from the catalytic effect of detritus. The oxidation behavior of the crude oil was studied by the TG-DSC, and the activation energy was calculated by Arrhenius kinetic model. The results indicated that heavy crude oil had poor reactivity in the LTO stage, and the activation energy in the LTO region was only 18.09 kJ/mol, which was much lower than that in the fuel deposition and high temperature oxidation stages (84.58 kJ/mol and 113.39 kJ/mol).

Key words: heavy crude oil, low temperature oxidation, oxygen consumption rate, oxidation kinetics, activation energy

稠油就地燃烧是提高稠油采收率的重要技术手段之一。相比于常规气驱,注空气具有价格低廉、来源广泛、工艺简单等优点^[1-3]。稠油就地燃烧通常可

划分为低温氧化、燃料沉积和高温氧化3个阶段^[4-5]。对于稠油油藏,低温氧化阶段的产物对燃烧前缘的可持续性具有重要的影响。因此,迫切需要对稠油

收稿日期:2019-04-03。

第一作者简介:蒲万芬(1961—),女,本科,教授,博士生导师,从事提高采收率理论及技术研究。通讯地址:四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail:pwf58@163.com

低温氧化特性和行为进行研究。近年来,国内外学者对稠油氧化的影响因素进行了诸多研究。ZHANG等^[6]研究指出,温度升高过程中重质组分会发生解胶现象,致使稠油氧化进程减弱,但是温度依然是影响稠油氧化效果的重要因素。ZHAO等^[7]通过HP-DSC研究了氧气分压对稠油氧化行为的影响,结果显示高氧气分压条件下稠油在低温氧化阶段释放出更高的热量。KÖK等^[8-9]通过TG-DTA技术研究了黏土矿物对原油氧化反应的影响,指出黏土矿物的加入能有效地降低原油氧化反应活化能以及 Arrhenius 常数,促进氧化反应进程。然而,由于不同稠油物化性质差异大,因此,目前对于稠油低温氧化特性及行为并没有形成明确的认识。为此,首先进行了恒温静态氧化管实验,研究了J区块稠油低温氧化特性,得到一定条件下温度、压力、石英砂和岩屑对稠油低温氧化效果的影响;其次采用TG/DSC研究了原油的氧化热行为;最后选用 Arrhenius 动力学模型计算活化能,对比分析了原油分别在低温氧化、燃料沉积和高温氧化阶段的活化能。研究结果对J区块稠油实施注空气就地燃烧有一定的指导意义。

1 实验部分

1.1 实验条件

主要实验材料:新疆J区块脱水稠油(油样基本物性见表1);筛取150~160目的石英砂(烘干);将油田现场提供的储层岩块碾成粉末状,筛选目数为150~160目(烘干)。

主要实验设备有:①德国耐驰同步综合热分析仪(型号:NETZSCH STA 449 F3 Jupiter);②DGM-III型多功能岩心驱替装置(恒温箱);③Agilent 7890B GC气相色谱仪;④ISCO型恒压恒速泵;⑤氧化管等。

表1 稠油的基本物性参数

Table 1 Basic physical parameters of heavy crude oil

黏度(40℃)/ (mPa·s)	密度(40℃)/ (g·cm ⁻³)	四组分, wt%			
		饱和烃	芳香烃	胶质	沥青质
17 418	0.943 5	28.09	31.45	32.86	7.60

1.2 稠油低温氧化实验步骤

1) 如图1所示连接好实验仪器并检查系统气密性,将稠油,稠油+石英砂和稠油+岩屑(稠油和石

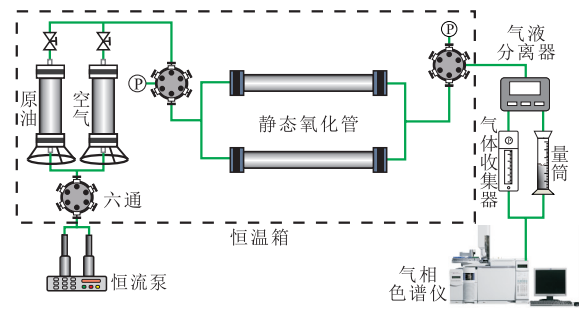


图1 静态氧化管实验流程

Fig. 1 Flow of static oxidation tube experiments

英砂,稠油和岩屑以1:1比例混合均匀)加入氧化管中。

2) 将干燥空气泵入氧化管中,达到指定压力,关闭氧化管注气口,再次检查系统气密性。

3) 将氧化管置于指定温度环境下的多功能岩心驱替装置,进行恒温静态氧化实验(氧化6d)。

4) 利用集气袋收集氧化后的产出气体,进行气相色谱分析,计算不同反应条件下的耗氧速率。

5) 计算不同反应条件下的碳氢比^[10]。

$$S = 4 \left[v_0 (\gamma_i / v_i) - a - 0.5b - \gamma_0 \right] / [a + b] \quad (1)$$

式中:S表示碳氢比值; γ_i 和 γ_0 分别为注入和剩余氧气含量,%; v_i 和 v_0 分别表示注入和剩余氮气含量,%; a 和 b 分别表示产出气中CO和CO₂含量,%。

6) 收集氧化反应后的油样,进行四组分分析,本次四组分含量采用NB/SH/T 0509—2010《石油沥青四组分测定法》测定。

7) 重复上述步骤1—6,进行不同温度、压力以及加入石英砂和岩屑对稠油低温氧化的影响分析。

1.3 TG/DSC同步热分析实验步骤

1) 首先将同步综合热分析仪调至TG-DSC模式,进行仪器校正^[11]。

2) 实验在常压气流中进行,称取10 mg稠油放入仪器进行TG-DSC测试,设定空气流量50 mL/min,升温速率10℃/min,实验温度范围30~700℃。

3) 为保证实验的精确性,本组实验进行2次。

1.4 动力学理论

阿伦尼乌斯(Arrhenius)动力学模型假设原油质量损失仅仅与反应速率常数、温度和样品剩余质量有关^[11],其反应方程式如下:

表2 静态氧化管实验结果
Table 2 Results of static oxidation tube experiments

实验编号	氧化管填充介质	温度/℃	压力/MPa	产出气分析					碳氢比	平均耗氧速率/(%·d ⁻¹)
				O ₂ , %	N ₂ , %	CO, %	CO ₂ , %	C ₁ —C ₆ , %		
1	稠油	30	15	19.84	80.16					
2	稠油	70	15	18.62	80.91	0.08	0.30	0.09	11.22	0.20
3	稠油	110	15	10.15	84.55	0.27	3.47	1.56	7.67	1.62
4	稠油	150	15	4.27	86.43	0.41	6.41	2.48	6.16	2.60
5	稠油+石英砂	110	15	8.44	85.04	0.31	4.54	1.67	6.53	1.88
6	稠油+岩屑	110	15	6.07	85.98	0.38	5.72	1.85	6.00	2.30
7	稠油+岩屑	110	10	6.85	85.81	0.34	5.37	1.63	6.20	2.16
8	稠油+岩屑	110	20	4.89	85.92	0.41	6.32	2.46	5.85	2.49
9	稠油+岩屑	110	30	3.27	86.39	0.48	7.36	2.50	5.36	2.76

$$dw/dt = kw^n \quad (2)$$

$$k = A_r \exp(-E/RT) \quad (3)$$

式(2)—式(3)中: k 为反应速率常数; w 为剩余样品质量,mg; t 为时间,min; A_r 为阿伦尼乌斯常数; R 为通用气体常数; E 为活化能,kJ/mol; T 为热力学温度,K。

原油的氧化反应通常被假设为一级反应^[12],联立式(2)—式(3)可简化为:

$$\log\left(\frac{dw}{dt} \cdot w^{-1}\right) = \log A_r - E/2.303RT \quad (4)$$

通过 $\log\left(\frac{dw}{dt} \cdot w^{-1}\right)$ 和 $1/T$ 曲线拟合直线的斜率和截距可以分别求得 E 和 A_r 。

2 实验结果与分析

2.1 稠油低温氧化效果影响因素分析

利用气相色谱仪对产出气进行测试分析,碳氢比和平均耗氧速率计算结果见表2。表3列出了不

表3 不同条件下氧化后稠油四组分分析

Table 3 Analysis of SARA fractions of heavy crude oil after oxidation reactions with different conditions

反应条件	饱和烃, wt%	芳香烃, wt%	胶质, wt%	沥青质, wt%
30 ℃	27.89	31.17	33.09	7.85
70 ℃	21.14	26.17	35.97	16.72
110 ℃	18.52	22.47	37.15	21.86
150 ℃	15.20	20.08	35.52	29.20
10 MPa	22.06	28.87	35.13	13.94
15 MPa	19.68	28.86	37.03	14.43
20 MPa	19.21	28.19	37.76	14.84
30 MPa	17.58	26.96	38.89	16.57
稠油+石英砂	22.84	29.08	35.24	12.84
稠油+岩屑	19.68	28.86	37.03	14.43

同温度、压力以及加入石英砂和岩屑后油样四组分含量。

2.1.1 温度对稠油低温氧化的影响

从表2可以看出,产出气中氧气含量随温度升高明显减少。不同温度下,CO+CO₂生成量依次为:0.38%(70 ℃)<3.74%(110 ℃)<6.82%(150 ℃)。随着温度增加,轻烃类(C₁—C₆)物质增加,这主要是挥发作用造成的^[13]。在30 ℃时,原油四组分含量几乎没有改变。可以认为在此温度下原油低温氧化反应程度微弱。当温度从70 ℃上升到110 ℃,平均耗氧速率由0.20 %/d上升至1.62 %/d,CO₂生成量由0.30 %上升至3.47 %。这说明温度在低温氧化过程中起着至关重要的作用。低温氧化阶段氧气分子与原油可能存在2种反应途径:加氧反应和断键反应^[14]。在低温氧化阶段初期,加氧反应占主导作用,产生多种含氧衍生物(酮、醛、羧酸等)和少量的CO。在低温氧化阶段后期,断键反应起主导作用,生成CO₂和水。随着氧化反应的深入,加氧反应生成的含氧衍生物继续氧化,发生脱羰和脱羧反应生成更多的CO,CO₂。由实验结果可得,O₂消耗量一直明显大于CO和CO₂生成量,这说明在研究温度范围内,加氧反应是稠油低温氧化阶段的主要反应途径。碳氢比大小是表征燃料燃烧化学性质的有效方法。在低温氧化过程中,氧原子易于攻击胶质、沥青质等强极性大分子中的活性氢,生成大量的含氧衍生物,从而促进氧化进程并且出现较低的碳氢比。本次研究中,随着温度从70 ℃升至150 ℃,碳氢比从11.22降至6.16,这说明温度的升高有利于加深稠油低温氧

化反应程度。

从氧化后稠油的四组分含量(表3)可以看出,随着温度升高,轻质组分(饱和烃和芳香烃)含量明显降低,沥青质含量增加。对于胶质,在70~110℃其含量增加主要是因为加氧反应和轻质组分的缩聚反应。相反,在110~150℃其含量呈现下降的趋势,这可能是因为胶质分子化学性质不稳定。YUAN等^[15]研究指出当氧化程度较高时,胶质易被氧化生成沥青质。轻质组分生成胶质的量少于胶质转化为沥青质的量,因此,出现了胶质含量降低的现象。

2.1.2 压力对稠油低温氧化的影响

从表2和表3可以看出,压力越高,产出气中O₂含量越低,CO+CO₂生成量越多。压力从10 MPa增加至30 MPa时,CO+CO₂生成量增加了2.13%。这是因为高压环境下,相同的接触面积上,氧气浓度增大,原油中的活性组分和氧气分子接触的概率增加,促进加氧反应,脱羧反应和脱羧反应,导致耗氧速率和CO+CO₂生成量增加,碳氢比降低,氧化效果更加明显。同时随着压力的升高,加氧反应生成的含氧衍生物进一步发生缩聚反应形成更大分子量的含氧衍生物,使得重质组分增加。这表明升高压力能够促进稠油低温氧化反应的发生。

2.1.3 石英砂及岩屑对稠油低温氧化的影响

从表2可以看出,平均耗氧速率:2.30%/d(稠油+岩屑)>1.88%/d(稠油+石英砂)>1.62%/d(稠油)。与原油相比,在分别加入石英砂和岩屑后,耗氧量和CO+CO₂生成量随之增加,碳氢比降低。这是因为固体颗粒的结构有利于为氧气分子扩散提供有效的路径,使得油样在低温氧化阶段反应得更加充分。在加入石英砂和岩屑后,耗氧量分别增加了1.71%和4.08%,岩屑表现出更明显的促进作用,这主要归因于岩屑的催化作用。PU等^[16]研究指出岩屑中的部分金属离子能够消耗原油中天然存在的氧化抑制剂从而促进氧化反应进程。从表3可以看出,氧

化后轻质组分减少,重质组分增加,加入石英砂或岩屑后,这种现象更加显著。说明石英砂和岩屑的比面效应有利于原油与氧气分子的接触,因此,氧化反应更加充分。并且,与石英砂相比,岩屑对稠油低温氧化具有更好的促进作用。

2.2 稠油低温氧化行为研究

2.2.1 TG/DSC分析

对稠油进行了TG-DSC热分析实验,得到TG(热重)曲线,DTG(失重速率)曲线和DSC(差示扫描热)曲线,结果见图2。表4列出了原油TG-DSC曲线特征参数。

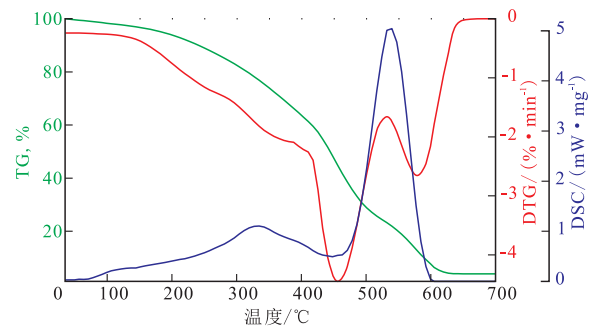


图2 稠油TG-DSC曲线

Fig. 2 TG-DSC curves of heavy oil

原油低温氧化温度区间为37.51~384.15℃,该阶段氧原子首先碰撞碳烃分子中的活性氢,发生加氧反应。随着低温氧化反应程度加深,产生的氧化衍生物进一步发生氧化/缩聚反应形成分子量更大的重质组分,为接下来的燃料沉积和高温氧化阶段提供物料准备,此阶段的质量损失为33.16%,普遍认为此阶段的质量损失主要是由于轻烃类组分挥发造成的^[17]。燃料沉积阶段的质量损失为42.88%,此阶段的质量损失主要是因为是在384.15~530.61℃温度区间内,部分含氧衍生物的烷基侧链和弱化学键断裂产生短链烃类,短链烃类在较高温度条件下易于挥发^[18]。此外,低温氧化残渣(含氧衍生物及重质组分)发生一系列氧化热裂解反应从而形成焦炭,为高

表4 稠油TG-DSC曲线特征参数

Table 4 Parameters of TG-DSC curves for heavy oil

反应阶段	温度区间/℃	质量损失,%	峰值温度/℃	热焓值/(kJ·g ⁻¹)	峰值热流量/(mW·mg ⁻¹)
低温氧化	37.51~384.15	33.16	329.83	0.87	1.13
燃料沉积	384.15~530.61	42.88			
高温氧化	530.61~655.46	19.53	536.61	1.39	5.07

温氧化提供原料。高温氧化阶段的温度区间为 530.61 ~ 655.46 °C,质量损失为 19.53 %,该阶段主要为焦炭的燃烧反应,产生 CO₂、CO 和 H₂O 等。总体上,稠油在低温氧化阶段经历了一系列复杂的加氧反应和缩聚反应后,生成芳香度更高的低温氧化衍生物。这部分衍生物能够作为在燃料沉积阶段氧化热裂解反应的主要原料,进而影响着高温氧化阶段燃烧前缘的持续推进。从原油的 DSC 曲线可以看出,低温氧化阶段出现较弱的放热现象,此阶段的峰值温度和热流量峰值分别是 329.83 °C 和 1.13 mW/mg。与低温氧化阶段相比,高温氧化阶段放热区域更加明显,该阶段的峰值温度和热流量峰值分别是 536.61 °C 和 5.07 mW/mg。相应地,由表 7 可以看出高温氧化阶段油样的热焓值大约是低温氧化阶段的 1.6 倍。高温氧化阶段焦炭燃烧放出的热量使得地层温度升高,原油黏度降低,流动性增强,对稠油就地燃烧具有关键性的意义。

2.2.2 动力学参数计算

选用阿伦尼乌斯(Arrhenius)动力学模型计算 E 和 A , 计算曲线见图 3。表 5 列出了原油 Arrhenius 动力学参数。

由图 3 和表 5 可以看出,各反应阶段动力学拟合

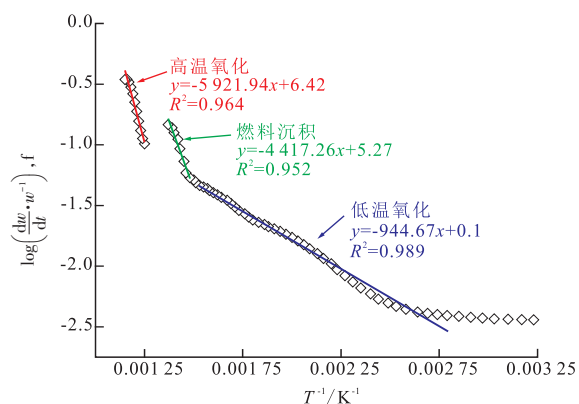


图 3 稠油 Arrhenius 方法氧化动力学计算曲线

Fig. 3 Calculation curves of oxidation kinetics for heavy oil based on Arrhenius method

表 5 稠油动力学参数

Table 5 Kinetics parameters of heavy oil

反应阶段	线性拟合斜率	活化能 / (kJ·mol ⁻¹)	阿伦尼乌斯常数 / min ⁻¹	R ²
低温氧化	-944.67	18.09	1.26	0.989
燃料沉积	-4 417.26	84.58	1.86×10 ⁵	0.952
高温氧化	-5 921.94	113.39	2.6310 ⁶	0.964

曲线的相关系数均在 95 % 以上,因此,计算得到的活化能和 Arrhenius 常数较为准确。原油在低温氧化阶段活化能为 18.09 kJ/mol,远低于燃料沉积和高温氧化阶段的活化能(84.58 kJ/mol 和 113.39 kJ/mol)。这是因为在低温氧化阶段,氧原子和稠油中氧化活性较高的胶质、沥青质等强极性大分子侧链上的活性氢更容易发生氧化反应,所以该反应阶段原油活化能很小。燃料沉积阶段氧化热裂解反应占主导地位并且形成焦炭。此阶段的活化能大于低温氧化阶段的活化能,说明裂解反应需要较高的能量去触发。与低温氧化和燃料沉积阶段的活化能相比,高温氧化阶段表现出更高的活化能,这可能与燃料沉积阶段生成的焦炭的反应活性和质量有关。ZHAO 等^[9]研究指出由于高温氧化阶段焦炭的燃烧反应需要更多的能量被激活,因此,高温氧化阶段的活化能明显高于低温氧化和燃料沉积阶段。

3 结论

1) 随着温度的上升,稠油在低温氧化阶段的 O₂ 消耗量,耗氧速率和 CO+CO₂ 生成量明显增加,表明温度的上升能够加快稠油低温氧化反应速度。压力从 10 MPa 增加至 30 MPa 时,CO+CO₂ 生成量增加了 2.13 %,表明压力的增加能够促进稠油低温氧化反应。与原油相比,加入石英砂和岩屑后耗氧量分别增加了 1.71 % 和 4.08 %。

2) 相比低温氧化阶段,稠油在高温氧化阶段出现明显的放热现象,该阶段的放热行为主要来自于焦炭的燃烧反应,并且热焓值大约是低温氧化阶段的 1.6 倍。

3) 稠油在低温氧化阶段活化能仅为 18.09 kJ/mol,这可能与稠油中胶质和沥青质等强极性大分子有关。燃料沉积和高温氧化阶段的活化能分别是 84.58 kJ/mol 和 113.39 kJ/mol。

参考文献

- [1] 李睿姍,何建华,唐银明,等.稠油油藏氮气辅助蒸汽增产机理试验研究[J].石油天然气学报,2006,28(1):72-75.
- [2] 王元基,何江川,廖广志,等.国内火驱技术发展历程与应用前景[J].石油学报,2012,33(5):909-914.
- [3] 张旭,刘建仪,孙良田,等.注空气低温氧化提高轻质油气藏采收率研究[J].天然气工业,2004,24(4):78-80.
- [4] PU W F, ZHAO S, PAN J J, et al. Effect of low-temperature oxidation of light oil on oil recovery during high pressure air injection

- tion[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2018, 36(13): 937-943.
- [5] HUANG S, SHENG J J. An innovative method to build a comprehensive kinetic model for air injection using TGA/DSC experiments[J]. *Fuel*, 2017, 210: 98-106.
- [6] ZHANG L, DENG J, WANG L, et al. Low-temperature oxidation characteristics and its effect on the critical coking temperature of heavy oils[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(2): 538-545.
- [7] ZHAO S, PU W F, YUAN C D, et al. Thermal behavior and kinetic triplet of heavy crude oil and its SARA fractions during combustion by high pressure differential scanning calorimetry[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(4): 3176-3186.
- [8] KÖK M V. Effect of clay on crude oil combustion by thermal analysis techniques[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2006, 84(2): 361-366.
- [9] KÖK M V, Gundogar A S. Effect of different clay concentrations on crude oil combustion kinetics by thermogravimetry[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2010, 99(3): 779-783.
- [10] LIU P G, PU W F, LI Y B, et al. Low-temperature isothermal oxidation of crude oil[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2016, 34(9): 838-844.
- [11] PU W F, PANG S S, JIA H. Using DSC/TG/DTA techniques to re-evaluate the effect of clays on crude oil oxidation kinetics[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2015, 134: 123-130.
- [12] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Oxidation kinetics of north sea light crude oils at reservoir temperature[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1999, 77: 385-394.
- [13] YUAN C D, VARFOLOMEEV M A, EMELIANOV D A, et al. Oxidation behavior of light crude oil and its SARA fractions characterized by TG and DSC techniques: differences and connections[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32: 801-808.
- [14] ZHAO S, PU W F, VARFOLOMEEV M A, et al. Comprehensive investigations into low temperature oxidation of heavy crude oil[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2018, 171: 835-842.
- [15] YUAN C D, PU W F, Jin F Y, et al. Characterizing the fuel deposition process of crude oil oxidation in air injection[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(11): 7622-7629.
- [16] PU W F, LIU P G, LI Y B, et al. Thermal Characteristics and Combustion Kinetics Analysis of Heavy Crude Oil Catalyzed by Metallic Additives[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(46): 11525-11533.
- [17] WEI B, ZOU P, SHANG J, et al. Integrative determination of the interactions between SARA fractions of an extra-heavy crude oil during combustion[J]. *Fuel*, 2018, 234: 850-857.
- [18] ZHAO S, PU W F, SUN B S, et al. Comparative evaluation on the thermal behaviors and kinetics of combustion of heavy crude oil and its SARA fraction[J]. *Fuel*, 2019, 239: 117-125.
- [19] ZHAO S, PU W F, HOU J F, et al. Low-temperature oxidation and thermal kinetics analysis of light and medium crude oil[J]. *Petroleum Science & Technology*, 2018, 36(7): 540-546.

(编辑 徐佩)

(上接第35页)

- [4] 孙晨. 提高海上稠油油藏早期注聚效果研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [5] 隋军, 廖广志, 牛金刚. 大庆油田聚合物驱油动态特征及驱油效果影响因素分析[J]. *大庆石油地质与开发*, 1999, 18(5): 17-20.
- [6] 刘晨, 王凯, 王业飞. 针对A油田的抗温、抗盐聚合物/表面活性剂二元复合驱油体系研究[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(3): 152-158.
- [7] 吴海俊, 付美龙, 孙晶, 等. 稠油油藏三元复合驱参数优化实验研究[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(4): 138-142.
- [8] 杨二龙, 贾聚全, 齐士琨, 等. 海上稠油油田聚驱后二元复合驱注入时机与注入方式优选[J]. *油田化学*, 2015, 32(2): 259-262.
- [9] 陈金凤, 李洁, 张丽娟. 大庆油田三元复合驱注入时机[J]. *大庆石油地质与开发*, 2015, 34(5): 91-96.
- [10] 叶仲斌. 提高采收率原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 69-73.
- [11] 张超, 叶仲斌, 施雷庭, 等. 疏水缔合聚合物建立流动阻力机理研究[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(4): 251-253.
- [12] 李国. 大庆油田聚合物驱后利用残余聚合物挖潜剩余油技术探索[J]. *油田化学*, 2010, 27(2): 192-195.
- [13] 俞启泰. 几种重要水驱特征曲线的油水渗流特征[J]. *石油学报*, 1999, 20(1): 56-60.
- [14] 万吉业. 水驱油田的驱替系列及其应用(II)[J]. *石油勘探与开发*, 1983, 1(10): 44-49.
- [15] 邹存友, 于立君. 中国水驱砂岩油田含水与采出程度的量化关系[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 288-292.
- [16] 郭智栋. 基于高残余阻力系数的高渗透稠油油藏聚合物驱驱替液技术[D]. 成都: 西南石油大学, 2011.

(编辑 常燕)