

文章编号: 0253-2697(2015)09-1135-06 DOI: 10. 7623/syxb201509012

## 稀油火烧油层物理模拟

唐君实<sup>1</sup> 关文龙<sup>1</sup> 蒋有伟<sup>1</sup> 王海宁<sup>1,2</sup> 王伯军<sup>1</sup> 李 秋<sup>1</sup> 郑浩然<sup>1</sup> 许海南<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油大学石油工程学院 北京 102249)

**摘要:**注空气开发主要分为稀油注空气低温氧化以及稠油火烧油层 2 种技术。针对轻质原油火烧油层技术开展研究,采用热重/差示扫描量热同步热分析仪研究稀油高温氧化放热特性和反应动力学参数;在实验压力为 5 MPa 条件下采用高压燃烧管研究稀油高温火烧前缘传播稳定性以及稀油火烧油层基础参数。研究结果表明:测试稀油高温氧化活化能为 148 kJ/mol,与文献中稠油高温燃烧反应活化能相近;人工点火后,稀油可以形成稳定的高温氧化前缘,实现稳定的高温燃烧驱替,前缘温度高达 500℃;出口 CO<sub>2</sub> 浓度和燃料的视 H/C 原子比进一步证明,燃烧前缘处的反应类型为高温氧化反应;稀油火烧油层驱油效率达 92%,空气/油比为 858 m<sup>3</sup>/t,具有较高的驱油效率和较低空气/油比。

**关键词:**稀油;火烧油层;高温氧化;动力学参数

**中图分类号:**TE345

**文献标识码:**A

## Physical simulation of light oil in-situ combustion

Tang Junshi<sup>1</sup> Guan Wenlong<sup>1</sup> Jiang Youwei<sup>1</sup> Wang Haining<sup>1,2</sup> Wang Bojun<sup>1</sup>

Li Qiu<sup>1</sup> Zheng Haoran<sup>1</sup> Xu Hainan<sup>1,2</sup>

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 100249, China)

**Abstract:** There are mainly two kinds of air injection development technologies, i. e., low temperature oxidation of light oil by air injection and heavy oil in-situ combustion. A study was carried out on light oil in-situ combustion, in which the simultaneous thermal analyzer (Thermal Gravimetric Analyzer/differential scanning calorimeter) was used to study the high-temperature oxidation heat release properties and reaction kinetic parameters of light oil. High-pressure combustion tube experiments were applied to study high-temperature combustion front propagation stability of light oil and basic parameters of light oil in situ combustion under the experimental pressure of 5 MPa. Research results show that the high temperature oxidation activation energy of light oil is 148 kJ/mol, close to that of heavy oil in literatures. After artificial ignition, a stable high-temperature oxidation front of light oil can be formed to realize stable oil displacement by high-temperature combustion under the front temperature of 500℃. The outlet CO<sub>2</sub> concentration and H/C atomic ratio of fuel further prove that the reaction type of combustion front is high temperature oxidation. Light oil in-situ combustion presents oil displacement efficiency of 92% and air/oil ratio of 858 m<sup>3</sup>/t, indicating higher oil displacement efficiency and lower air/oil ratio.

**Key words:** light oil; in-situ combustion; high temperature oxidation; kinetic parameters

**引用:**唐君实,关文龙,蒋有伟,王海宁,王伯军,李秋,郑浩然,许海南. 稀油火烧油层物理模拟[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1175-1140.

**Cite:** Tang Junshi, Guan Wenlong, Jiang Youwei, Wang Haining, Wang Bojun, Li Qiu, Zheng Haoran, Xu Hainan. Physical simulation of light oil in-situ combustion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1175-1140.

注空气开发采油主要分为稀油注空气低温氧化和稠油火烧油层 2 种不同的开发技术<sup>[1]</sup>,这 2 种注空气开发技术具有不同的特征和机理。稀油注空气低温氧化技术是向原始油藏注入空气,通过氧化反应释放出一定热量维持和提高反应区温度,达到有效消耗氧气,产生 CO<sub>2</sub> 的目的。其开发机理是烟道气驱加上部分热效应<sup>[2,3]</sup>。如果氧气在地层内没有通过低温氧化反应充分消耗,使生产井氧浓度达到 10%,则会带来安

全风险<sup>[4,5]</sup>。稠油火烧油层技术是通过人工点火形成温度大于 350℃ 的高温燃烧前缘,实现油层内燃烧放热,将原油从注气井推向生产井<sup>[6,7]</sup>。火烧油层技术具有采收率高、热效率高、适用范围广等优点<sup>[7,8]</sup>。如将稠油火烧油层技术引入稀油油藏,利用高温燃烧前缘快速消耗氧气,则一方面可解决稀油注空气中的氧安全问题,另一方面可以提高采收率。

本文对稀油油藏火烧油层开发进行了室内实验研

**基金项目:**国家重大科技专项(2011ZX05012-002)资助。

**第一作者及通信作者:**唐君实,男,1984 年 10 月生,2006 年获清华大学学士学位,2011 年获清华大学博士学位,现为中国石油勘探开发研究院热力采油研究所工程师,主要从事注空气开发技术研究。Email: tjsh@petrochina.com.cn

究。采用热重/差示扫描量热同步热分析仪研究了稀油氧化放热特性,测量了稀油高温氧化反应动力学参数。采用高压燃烧管系统研究了稀油火驱高温前缘传播的稳定性,并测量了稀油火烧油层的基础参数,从而为稀油油藏火烧油层开发提供一定技术支持。

## 1 稀油注空气技术室内研究现状

稀油注空气低温氧化技术是经济可行的提高采收率方法,对于注水困难的低渗透油藏尤其适用<sup>[1,9]</sup>。注空气开发过程中,原油和空气中的氧气存在低温氧化(加氧反应)和高温氧化(断键燃烧)两种不同反应类型<sup>[10,11]</sup>。稀油注空气低温氧化技术主要利用低温氧化反应消耗氧气,产出CO<sub>2</sub>。而稠油火烧油层前缘处发生的主要是焦碳类物质与氧气间的高温氧化反应,该反应是火烧前缘得以稳定传播的主要能量源<sup>[10,11]</sup>。

对于稀油与空气反应的机理,国内外学者多针对低温氧化过程开展研究。稀油低温氧化反应以加氧反应为主,原油与氧气发生复杂反应生成醛、酮、醚等物质<sup>[2]</sup>。同时,稀油低温氧化反应会造成原油成分的变化,使得原油中的芳烃含量减少,胶质含量增加<sup>[12]</sup>。常压条件下,稀油蒸馏过程会影响低温氧化过程,使常压仪器较难得到准确的低温氧化动力学参数<sup>[13]</sup>。对于稀油氧化动力学,国内外学者多采用加速量热仪<sup>[14,15]</sup>、差示扫描量热仪<sup>[13,16]</sup>、热重分析仪<sup>[17]</sup>以及驱替反应装置<sup>[18-20]</sup>进行研究,测量得到的低温氧化活化能范围在27~306 kJ/mol。而有关稀油高温氧化动力学研究的相关报道较少。

稀油注空气物理模拟研究主要采用长氧化管<sup>[3,21]</sup>和燃烧管<sup>[22]</sup>。徐卫东<sup>[21]</sup>等采用长氧化管研究了温度和压力对稀油低温氧化反应的影响。其研究表明稀油低温氧化耗氧速率随温度和压力的升高而升高。在同一压力下,驱油效率随温度的升高而增大<sup>[21]</sup>。任韶然<sup>[3]</sup>在长氧化管装置上进行了低温氧化驱油实验。其研究表明在气体突破以前,稀油注空气主要的作用机制是烟道气驱;气体突破之后,烟道气和高温反应带共同作用为其主要机制。郭平等<sup>[18]</sup>在卡尔加里大学的燃烧管上开展稀油注空气实验,在人工点火的条件下,稀油可形成温度为300℃的氧化放热前缘。但氧化前缘不稳定,前缘温度持续下降,需要进行二次点火才能完成实验。Clara等<sup>[23]</sup>在进行稀油燃烧管实验时,观察到了280℃的氧化放热前缘,氧化前缘未能在整个燃烧管中稳定传播。Teramo等<sup>[24]</sup>在卡尔加里大学开展了稀油火驱燃烧管实验,观察到了在320℃稳定传播的氧化前缘。已有研究表明,在一定的操作条件下,稀油注空气开发可形成约300℃的氧化放热前缘,氧

化前缘可在一定条件下稳定传播。前缘温度小于350℃,氧化前缘的反应模式有待进一步研究。可以看出,可否形成稳定传播的高温氧化燃烧前缘是稀油油藏能否采用火烧油层开发的关键,而稀油火驱前缘的燃烧状态还有待进一步研究。

## 2 稀油注空气实验

### 2.1 实验样品

实验中采用的油样为海塔某区块稀油油样。在实验之前,采用《SY/T 6316-1997 稠油油藏流体物性分析方法:原油黏度的测定》标准<sup>[25]</sup>对样品进行脱水、除杂处理。处理后的脱水油样含水率小于0.5%,50℃地面脱气原油黏度为23.1 mPa·s。

### 2.2 热分析实验

本文采用Mettler Toledo公司生产的TGA/DSC 1同步热分析仪研究稠油高温氧化过程。该装置可同时测量重量信号和放热量信号,具备热重(TG)和差示扫描量热(DSC)分析功能。实验过程中保护气为N<sub>2</sub>,流量为79 mL/min;反应气为氧气,流量为21 mL/min。两路气体在反应室内混合均匀后横掠过坩埚表面,经过扩散作用到达物料层,物料表面的氧浓度为21%。

为了让油样在样品盘内可以均匀地参与反应,本文将脱水原油与粒径为100~200目的分析纯SiO<sub>2</sub>颗粒按质量比1:9进行混合,将油样吸附分散在颗粒表面。采用50 mg混合SiO<sub>2</sub>的油样(含5 mg纯油),作为实验样品。

### 2.3 动力学模型

火烧油层开发时,地层内高温氧化过程为油焦与氧气间的气-固反应,其反应速率动力学表达式可以表示为<sup>[26]</sup>:

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha)p_{O_2} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为样品的转化率, $\alpha = \frac{m - m_i}{m_0 - m_i}$ ;  $m$ 、 $m_0$ 和 $m_i$ 分别为样品在反应过程中的质量、样品的初始质量和样品的最终质量,g; $t$ 为时间,s; $k$ 为反应的动力学常数, $k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ ,1/(s·Pa); $A$ 为反应的指前因子,1/(s·Pa); $E$ 为反应的活化能,kJ/mol; $R$ 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $T$ 为温度,K; $f(\alpha)$ 为样品的机理函数; $p_{O_2}$ 为氧气分压,Pa。

在很多稠油氧化动力学研究中,油样机理函数 $f(\alpha)$ 常简化为 $n$ 阶指数形式,其表达式为:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (2)$$

式中: $n$ 为反应级数,其取值范围通常为0~2。

高温氧化反应动力学参数计算依据石油天然气行业标准《SY/T 6954-2013 稠油高温氧化动力学参数测定方法:热重法》<sup>[27]</sup>中使用的FWO等转化率法进行计算。采用5种不同的升温速率2 K/min、3 K/min、5 K/min、7 K/min、10 K/min进行组合实验。将不同实验高温氧化特征转化率所对应的 $\lg\beta$ 与温度倒数 $(1/T)$ 作图计算活化能。

$$E = -2.19R \frac{d\lg\beta}{d(1/T_0)} \quad (3)$$

式中: $\beta$ 为升温速率,K/min; $T_0$ 为特征转化率 $\alpha_0$ 所对应的特征温度,K。

指前因子 $A$ 的计算方法为:

$$A = \beta_0 E \frac{e^{\frac{E}{RT_0}}}{p_{O_2} RT_0^2} \quad (4)$$

式中: $\beta_0$ 为组合升温速率实验的中值升温速率, $\beta_0 = 5$  K/min。

特征转化率的计算方法以及动力学参数具体的计算步骤参照文献<sup>[26,27]</sup>。

#### 2.4 高压燃烧管实验

燃烧管实验系统(图1)主要由高压舱、燃烧管、产出系统和控制系统等部分组成。燃烧管水平放置,直径4.4 cm,壁厚2 mm。实验过程中,高压舱内氮气围压压力始终大于燃烧管压力。高压舱与燃烧管最大压差2 MPa。燃烧管主体部分长度为80 cm(不含两侧法兰以及入口和出口管线)。每5 cm一段,每段装有一个热电偶引出管,引出管内插入一根热电偶置于岩心中部,测量岩心温度。外壁侧面装有一根壁面热电偶用于测量燃烧管外壁面温度,紧贴壁面有加热器。实验过程中,通过加热器对模型外壁面加热,使壁面温度跟踪岩心温度,消除模型径向温差,降低模型径向散热。

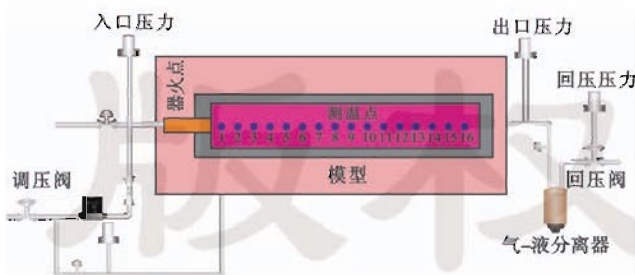


图1 燃烧管实验系统

Fig. 1 Combustion tube experiment system

模型装填方法参考石油天然气行业标准《SY/T 6898-2012 火烧油层基础参数测定方法》<sup>[28]</sup>。从高压舱外产出井口对模型抽真空后,对模型饱和水,饱和水体积592 mL。采用油驱水的方式饱和原油,饱和油量为380 mL。模型初始含油饱和度64%,初始含水饱和

度36%。模型孔隙度为0.42,渗透率为2.1 D。实验条件为:模型出口压力5 MPa,高压舱氮气围压5.4~5.7 MPa,点火温度410℃,空气流量1 L/min,通风强度 $40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,油藏温度82℃。

通过燃烧管实验,可以获得火驱开发油藏工程设计所需要的基础参数。其中燃料消耗量是指在设定通风强度下燃烧带扫过单位体积油砂消耗的燃料质量;空气消耗量是指燃烧带扫过单位体积油砂消耗的空气在标准状况下的体积;燃料消耗率是指燃烧带扫过油藏单元体积中消耗燃料的质量占该单元地质储量质量的百分比;火烧油层驱油效率是指从燃烧带扫过的油藏单元体积中被驱替出的那部分石油储量质量占该单元体积地质储量质量的百分数。具体计算方法依据燃烧管实验中稳定燃烧阶段不同气体的产出量进行计算,详见文献<sup>[28]</sup>。

### 3 稀油氧化放热特性实验

稀油热重实验得到的TG曲线、DTG曲线如图2所示(实验升温速率为5 K/min)。TG曲线中纵坐标是样品质量分数 $m/m_0$ ,DTG曲线纵坐标为 $da/dt$ ,是转化率 $\alpha$ 对反应时间的一阶导数,代表了氧化反应速率(图2)。在整个实验区间内,样品的失重曲线十分光滑,不存在样品分层燃烧现象,是有效的动力学实验<sup>[26]</sup>。图3是差示扫描量热法测量得到的样品放热曲线。当反应温度小于280℃时,蒸发相变作用超过低温氧化。在这个区域内,样品失重主要是由于稀油样品蒸发引起。图3放热曲线中该温度范围内并不存在与失重曲线相匹配的放热量。当反应温度达到280℃后,DTG曲线出现一个反应速率尖峰,这是由于原油低温氧化反应的失重速率超过了蒸发作用。放热曲线相应位置上也存在明显的放热峰。当反应温度达到350℃以上时,反应机制转化为油焦与氧气间的高温氧化反应。在490℃时,达到峰值速率顶点,峰值反

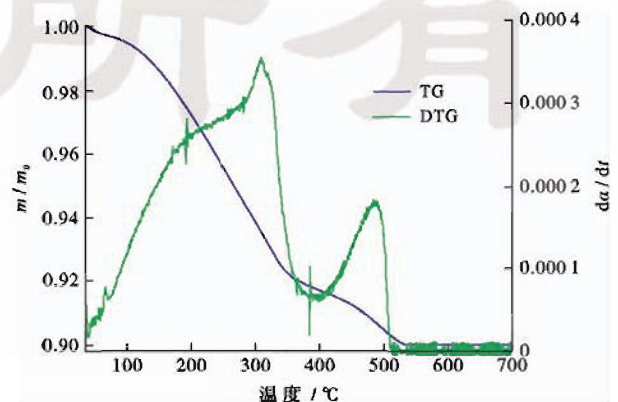


图2 热重与微商热重曲线(升温速率5K/min)

Fig. 2 TG and DTG curves with heating rate of 5K/min

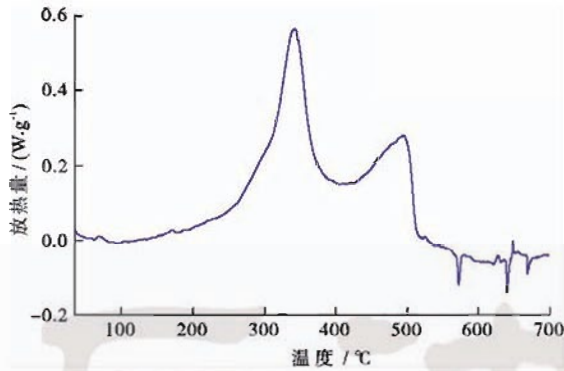


图3 样品放热曲线

Fig. 3 DSC curve of light oil sample

应速率为  $1.85 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。峰值速率要小于低温氧化峰值速率。

为了测量样品高温氧化动力学参数,开展了  $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $7^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $10^\circ\text{C}/\text{min}$  不同升温速率下的动力学实验(图4),数据处理方法参见文献[26]。选取图2中高温燃烧峰所对应的特征转化率0.92,计算  $\lg\beta$  随温度倒数变化关系(图5)。由图5中曲线斜率计算得到,油焦氧化的活化能为  $148 \text{ kJ/mol}$ 。

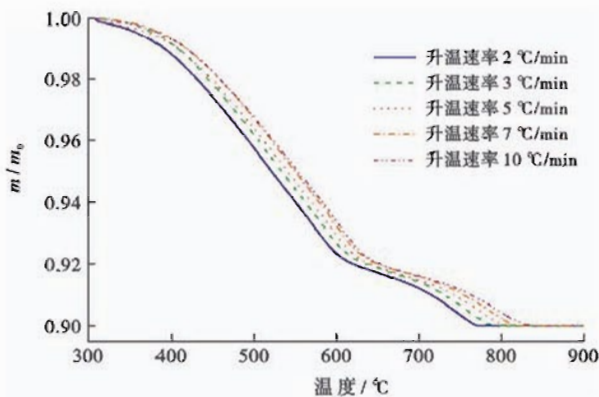
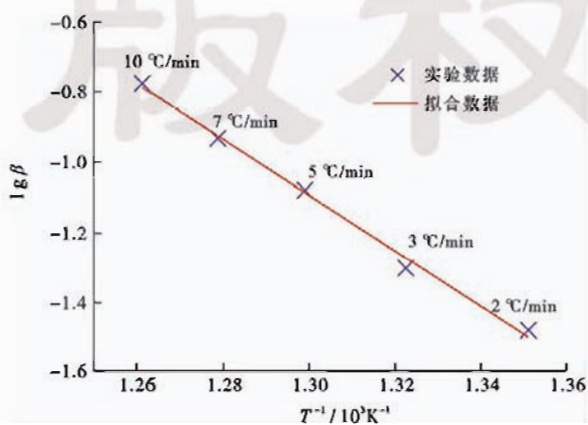


图4 不同升温速率下的热重曲线

Fig. 4 TG curves with different heating rates

图5  $\lg\beta$  与  $1/T$  温度关系Fig. 5 Relationship between  $\lg\beta$  and  $1/T$ 

指前因子根据 Kissinger 表达式<sup>[26]</sup>计算,为  $31.4 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。对于本文测试油样,反应活化能较为接近文献[26]中的稠油样品,但是其高温氧化的峰值速率要低于稠油,且火烧过程中前缘放热量应小于稠油样品。

#### 4 稀油火驱燃烧管实验

在实验开始时,使用燃烧管的前3段作为点火段,在  $\text{N}_2$  气氛下进行升温,点火器达到  $410^\circ\text{C}$  后注入氧气。当油层成功点燃后,关掉点火器。在点火阶段,岩心点最高温度如图6所示。在点火初期,由于模型端面散热较大,前两段岩心温度并未出现大幅度上升,最高温度约为  $400^\circ\text{C}$ 。3号岩心热电偶最高温度达到  $600^\circ\text{C}$ ,远超模型壁面温度(由于高压舱有  $5.5 \text{ MPa}$  的  $\text{N}_2$  围压,对模型壁面的对流散热作用明显),模型被成功点燃,此时模型所有加热瓦被设定为跟踪模式,壁面温度被设定为跟踪岩心温度,并小于岩心温度  $2^\circ\text{C}$ (防止外部热量进入模型)。从第4个点开始,进入稳定燃烧阶段。随着空气的持续注入,燃烧前缘不断向前推进直到第13段,前缘温度一直稳定在约  $500^\circ\text{C}$ 。后3段由于模型产出端法兰在高压氮气围压条件下端面散热大,前缘温度下降至  $500^\circ\text{C}$  以下。火驱过程中燃烧管的温度剖面如图7所示,高温燃烧前缘稳定向前

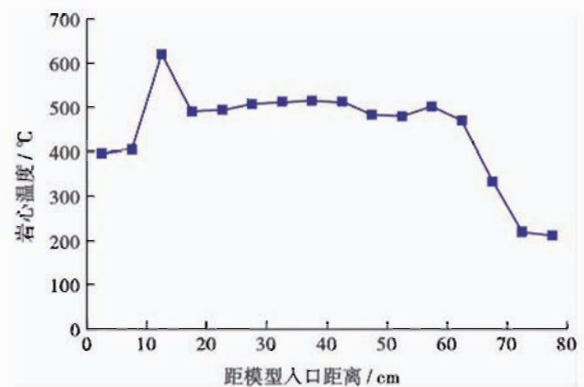


图6 不同位置测量的岩心最高温度

Fig. 6 Maximum core temperatures at different positions

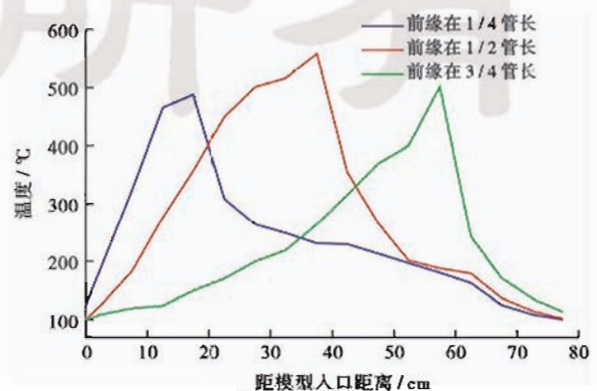


图7 温度剖面曲线

Fig. 7 Temperature profiles at different stages

传播。实验结果表明,对于测试的稀油样品,可以形成稳定传递的高温前缘,前缘温度高达 500℃,前缘处的主要反应类型是油焦与氧气间的高温氧化反应,具有稠油火烧油层类似的特征和机理。与已有研究<sup>[18,23,24]</sup>相比,本文实验条件下得到的燃烧前缘温度高,可达 500℃,远超低温氧化和高温氧化的分界温度 350℃,反应类型为明确的高温氧化模式。

稳定燃烧阶段,模型出口产出气体组分如图 8 所示。当燃烧管进入稳定燃烧阶段,出口 CO<sub>2</sub> 浓度稳定在 14%,出口 CO 浓度约在 4%,氧气浓度一直维持在 0.2% 以下。出口的高浓度 CO<sub>2</sub> 表明前缘处的反应类型为高温氧化反应。据文献[28],由稳定燃烧阶段燃烧管出口不同气体的产出量进行计算得到的火烧油层基础参数如表 1 所示。

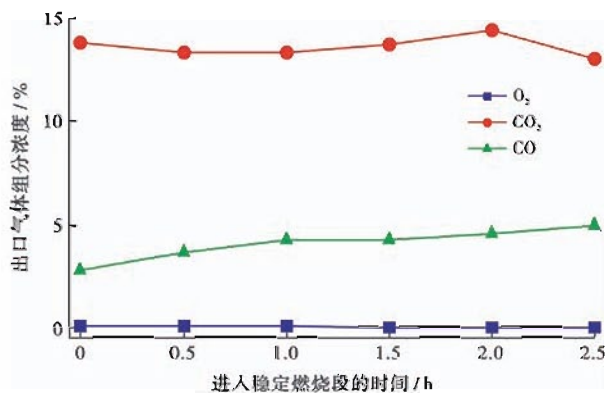


图 8 燃烧管尾气成分

Fig. 8 Tail gas compositions of combustion tube

表 1 样品火烧油层基础参数

Table 1 Basic parameters of in-situ combustion sample

参数	数据	参数	数据
通风强度/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	40	燃料消耗率/%	8.12
点火温度/℃	410	阶段空气/ 油比/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	858
视 H/C 原子比	1.2	燃烧前缘推进 速度/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	186
燃料消耗量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	20	氧气利用率/%	99.7
空气消耗量/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )	194	驱油效率/%	91.9

稀油火驱过程中,燃料消耗量为 20 kg/m<sup>3</sup>,阶段空气/油比为 858 m<sup>3</sup>/t,远低于稠油火驱开发的相应指标<sup>[29]</sup>,使得稀油火驱具有较高的驱替效率,驱油效率高达 92%,比已有研究<sup>[18]</sup>中 300℃氧化前缘的驱油效率更高。本文实验通风强度 40 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)较高,有利于结焦带前方低温氧化区焦炭燃料沉积,增强稀油火驱稳定性。燃料视 H/C 原子比为 1.2,进一步表明燃烧前缘处的反应类型为高温氧化反应,对于测试的稀油样品,注空气开发可以形成稳定的高温燃烧驱替,具有稠油火烧油层类似的特征和机理。

## 5 结 论

(1) 稀油火驱可以形成稳定的高温氧化前缘,实现稳定的高温燃烧驱替,前缘温度高达 500℃,出口 CO<sub>2</sub> 浓度和燃料的视 H/C 原子比进一步证明,高温前缘处的反应类型为高温氧化反应。

(2) 测试稀油高温氧化活化能约为 148 kJ/mol,与文献中稠油高温燃烧反应活化能相近。

(3) 在实验条件下,稀油火烧油层驱油效率高达 92%,空气/油比 858 m<sup>3</sup>/t,具有较高的驱油效率和较低空气/油比。

## 参 考 文 献

- [1] 王杰祥,徐国瑞,付志军,等.注空气低温氧化驱油室内实验与油藏筛选标准[J].油气地质与采收率,2008,15(1):69-71.  
Wang Jiexiang, Xu Guorui, Fu Zhijun, et al. ITO laboratory experiments and reservoir selection criteria of air injection[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 69-71.
- [2] 蒋有伟,张义堂,刘尚奇,等.低渗透油藏注空气开发驱油机理[J].石油勘探与开发,2010,37(4):471-476.  
Jiang Youwei, Zhang Yitang, Liu Shangqi, et al. Displacement mechanisms of air injection in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 471-476.
- [3] 任韶然,杨昌华,侯胜明,等.注气体积和轻质油藏空气驱机制的关系探讨[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(3):121-125.  
Ren Shaoran, Yang Changhua, Hou Shengming, et al. Relationship between air volume and oil-recovery mechanism for light oil air injection process[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2012, 36(3): 121-125.
- [4] 于洪敏,左景荣,任韶然,等.注空气采油井产出气体燃爆特性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(6):99-103.  
Yu Hongmin, Zuo Jingrong, Ren Shaoran, et al. Explosion characteristics of oil well produced gas by air injection for improved oil recovery[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2010, 34(6): 99-103.
- [5] 吉亚娟,周乐平,赵泽宗,等.注空气采油工艺的风险分析及安全控制技术[J].石油化工安全环保技术,2007,23(3):19-23.  
Ji Yajuan, Zhou Leping, Zhao Zezong, et al. Risk analysis and safety control for air injection EOR process[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2007, 23(3): 19-23.
- [6] 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):168-176.  
Wang Yuanji, He Jiangchuan, Liao Guangzhi, et al. Overview on the development history of combustion drive and its application prospect in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 168-176.
- [7] 何江川,廖广志,王正茂.油田开发战略与接替技术[J].石油学报,2012,33(3):519-525.  
He Jiangchuan, Liao Guangzhi, Wang Zhengmao. Oilfield development strategy and replacement techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 519-525.

- Sinca, 2012, 33(3): 519-525.
- [8] 王艳辉, 陈亚平, 李少池. 火烧驱油特征的实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 69-71.  
Wang Yanhui, Chen Yaping, Li Shaochi. Experiment study on oil displacement by in situ combustion[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(1): 69-71.
- [9] 侯胜明, 刘印华, 张建丽, 等. 轻质油油藏注空气自发点燃延迟时间预测模型[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 61-66.  
Hou Shengming, Liu Yinhu, Zhang Jianli, et al. A predictive model of spontaneous ignition delay of light-oil air-injection[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(3): 61-66.
- [10] Moore R G, Mehta S A, Ursenbach M G. A guide to high pressure air injection (HPAI) based oil recovery[R]. SPE 75207, 2002.
- [11] Ursenbach M G, Moore R G, Mehta S A. Air injection in heavy oil reservoirs - a process whose time has come (again)[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2010, 49(1): 48-54.
- [12] 程月, 张懋, 袁鉴, 等. 低温氧化对原油组成的影响[J]. 化学研究, 2007, 18(1): 67-69.  
Cheng Yue, Zhang Qiao, Yuan Jian, et al. Effect of low temperature oxidation on the composition of crude oil[J]. *Chemical Research*, 2007, 18(1): 67-69.
- [13] Li J, Mehta S A, Moore R G, et al. New insights into oxidation behaviours of crude oils[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48(9): 12-15.
- [14] Sarma H K, Yazawa N, Moore R G, et al. Screening of three light-oil reservoirs for application of air injection process by accelerating rate calorimetric and TG/EDSC tests[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2002, 41(3): 50-61.
- [15] 杜建芬, 郭平, 王仲林, 等. 轻质油藏高压注空气加速量热分析实验研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 17-21.  
Du Jianfen, Guo Ping, Wang Zhonglin, et al. Laboratory research of accelerating rate calorimeter test of high-pressure air injection at light oil reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(2): 17-21.
- [16] Li J, Mehta S A, Moore R G, et al. Investigation of the oxidation behavior of pure hydrocarbon components and crude oils utilizing PDSC thermal technique [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2006, 45(1): 48-53.
- [17] Jia Hu, Zhao Jinzhou, Pu Wanfen, et al. Thermal study on light crude oil for application of high-pressure air injection (HPAI) process by TG/DTG and DTA tests[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(3): 1575-1584.
- [18] 郭平, 汪艳, Li Jian, 等. 轻质油藏注空气燃烧管试验[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 60-63.  
Guo Ping, Wang Yan, Li Jian, et al. Combustion-tube test of air injection for light-oil reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2008, 32(1): 60-63.
- [19] Cinar M, Castaner J. M, Kovscek A R. Improved analysis of the kinetics of crude-oil in-situ combustion[R]. SPE 113948, 2008.
- [20] Gréaves M, Ren S R, Xia T X. New air injection technology for IOR operations in light and heavy oil reservoirs[R]. SPE 58295, 1999.
- [21] 徐卫东. 高压长氧化管动态模拟试验研究[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2008, 30(6): 338-340.  
Xu Weidong. Research of light oil HPAI by long oxidation tube [J]. *Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2008, 30(6): 338-340.
- [22] 李松林, 陈亚平, 王东辉. 轻质油油藏注空气实验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2004, 19(2): 27-28.  
Li Songlin, Chen Yaping, Wang Donghui. Experimental study on increasing recovery factor of light oil reservoir by air injection [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2004, 19(2): 27-28.
- [23] Clara C, Durandeu M, Quenault G, et al. Laboratory studies for light-oil air injection projects: potential application in handil field [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 3(3): 239-248.
- [24] Teramoto T, Uematsu H, Takabayashi K, et al. Air injection EOR in highly water saturated light-oil reservoir [R]. SPE 100215, 2006.
- [25] 油气田开发专业标准化委员会. SY/T 6316-1997 稠油油藏流体物性分析方法: 原油粘度的测定[S]. 北京: 石油工业出版社, 1998.  
Professional Committee for Standardization of Oil and Gas Field Development. SY/T 6316-1997 Analytical approach of fluid physical property for heavy-oil reservoirs: crude oil viscosity measurements[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [26] 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.  
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.
- [27] 油气田开发专业标准化技术委员会. SY/T 6954-2013 稠油高温氧化动力学参数测定方法: 热重法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2014.  
Professional Committee for Standardization of Oil and Gas Field Development. SY/T 6954-2013 Standard test method for high temperature oxidation kinetic parameters for heavy oil; thermogravimetric method[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [28] 油气田开发专业标准化技术委员会. SY/T 6898-2012 火烧油层基础参数测定方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2012.  
Professional Committee for Standardization of Oil and Gas Field Development. SY/T 6898-2012 Experimental testing method of in situ combustion parameters[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [29] 王国库. 火烧油层热力采油过程的实验研究与数值模拟[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.  
Wang Guoku. Experimental research and numerical simulation of thermal flooding process of in-situ combustion [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.

(收稿日期 2015-03-27 改回日期 2015-07-26 编辑 王培玺)