

文章编号:1673-5005(2012)05-0114-05

火驱燃烧状态判定试验

袁士宝¹, 宁奎², 蒋海岩³, 孙希勇², 张弘韬², 王修文²

(1. 西安石油大学石油工程学院, 陕西西安 710065; 2. 辽河油田公司储气部, 辽宁盘锦 124010;
3. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:在火烧油层的燃烧过程中需要监测油、气、水的变化。为了充分利用监测数据,在室内燃烧管试验的基础上,监测产出气体随时间的变化,引入氧气含量导数和气体指数(产出废气实际值与理论值之比)的概念,利用产出气体组合曲线结合火烧油层机制对火烧油层过程进行阶段划分,考查各阶段的特征。结果表明:火烧油层过程可划分为通风、点火、稳定、衰减、熄灭5个阶段;产出气体组合曲线可以作为判断火烧油层燃烧阶段和燃烧状态的依据;在火烧油层稳定燃烧阶段,产出端气体指数一般为0.66~1,低于0.66则燃烧状况不好,甚至灭火;该分析方法简单可行,所得结果与现场资料吻合良好。

关键字:试验;火烧油层;阶段划分;气体含量

中图分类号:TE 132.1 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.05.021

Experiments of judging combustion state of in situ combustion

YUAN Shi-bao¹, NING Kui², JIANG Hai-yan³, SUN Xi-yong², ZHANG Hong-tao², WANG Xiu-wen²

(1. College of Petroleum Engineering in Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. Department of Reserve Gas, Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, China;
3. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Monitoring the variations of oil, gas and water production in the process of in situ combustion is needed. In order to use the monitoring data fully, on the basis of combustion tube experiments, the output gas variation with time was monitored. The conception of oxygen content derivative and gas index (the ratio of output gas actual value and theoretical value) were introduced. Using the output gas composite curve and combined with the combustion mechanism, in situ combustion process was divided and each reaction stage features were examined. The results show that in situ combustion process can be divided into five stages such as ventilation, ignition, stabilization, attenuation and extinction stage. The gas production curve can be used as a basis to judge in situ combustion stage and combustion state. In situ combustion stable combustion stage, output end gas index is about 0.66-1, if it's less than 0.66, the combustion status is bad, even fire extinction occurs. This analysis method is simple and feasible, and the result agrees well with the field data.

Key words: experiment; in situ combustion; stage division; gas content

火烧油层作为一种热力采油方法,前人已对其火驱方式^[1]、筛选标准^[2-3]以及效果预测^[4]等相关的一整套技术进行了大量研究。火烧油层已经成为稠油油藏蒸汽吞吐后期的主要接替开发手段。在火烧油层采油过程中需要监测产出油、气、水的变化,一般都从产量变化上分析措施是否见效,但是不能

判断出地下原油燃烧的状态和燃烧阶段,文献[5]中提出了一种利用压力变化监测火烧油层燃烧状态的方法,但该方法不容易推广到现场。为了充分利用产出气监测数据,笔者以室内试验为基础引入气体含量变化导数的概念,用多条曲线来综合判断火烧油层燃烧阶段。

收稿日期:2011-12-28

基金项目:中石油辽河油田重大先导性科研项目;陕西省教育厅科研计划项目(11JK0782)

作者简介:袁士宝(1977-),男(汉族),黑龙江宾县人,讲师,博士,现从事热采及油藏管理方面的研究工作。

1 试验装置及试验过程

1.1 试验装置

试验采用中国石油大学(华东)火烧驱油模拟装置,模型结构详见文献[6]。燃烧管是火烧油层试验的核心设备,由一根内管(岩心管)和一根同心的外管(外护套)构成。燃烧管装砂主体部分长2.0 m,内径0.191 m,壁厚6 mm,保温层厚60 mm,充填物为硅酸铝。在内管外壁上缠有2段电阻丝,每段宽约1 m,用于维持内管内外壁温度,减少热损失。热电偶的引出管位于每段电阻丝的中间位置。模型上装有转动机构,使燃烧管在其轴线所在的竖直平面内任意转动并可固定在水平及竖直位置。燃烧管左侧装有点火电热管,在试验开始时点燃油砂。产出油、水与烟道气一起从出口排出,利用产出流体采集系统计量产油、产水和产气量,并分析产出气体中各主要组分含量。燃烧管结构示意图如图1所示。

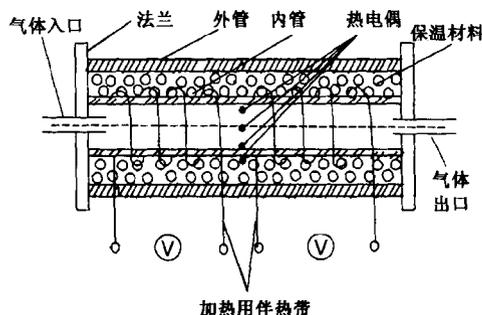


图1 燃烧管结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combustion tube structure

1.2 试验过程

试验条件:燃烧管中油砂渗透率为 $1.0 \mu\text{m}^2$,孔隙度为0.25,试验设定回压为3 MPa,油样取自现场。

试验步骤:

(1)按照油藏的含油饱和度和孔隙度黏土含量等配制油砂,装入燃烧管,并将油砂压实。

(2)向燃烧管通氮气,同时通过管外加热器加热燃烧管内油砂,通过自动控制系统控制油砂的温度,最后油砂温度稳定在设定的温度。

(3)向燃烧管通空气,空气流量控制在设定值。同时记录燃烧管内的温度场分布,进口注气压力,产出气体组分等数据。根据方案到达规定的试验时间后停止注气。

(4)试验结束后进行试验数据分析,并设计下一次试验方案。

2 火烧油层阶段划分

划分燃烧阶段要根据火烧油层燃烧机制结合燃烧特征综合分析。原油的氧化一般有两种:低温氧化和高温反应。所谓低温氧化是指原油在注空气过程中生成了以酸、醛、酮为主的有机化合物,没有 CO_2 生成;而燃烧反应就是通常所说的火烧油层,原油中的重质成分作为燃料和氧气反应,生成了 CO_2 、 CO 、 H_2O ,由于反应不完全等原因,也有部分 O_2 排出。系统温度是造成两个不同反应的決定因素,一般认为系统预热温度在 $343 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上会有稳定的燃烧或裂解反应发生^[7]。

稠油大部分都是长链碳氢化合物,火烧油层生产井的产出气体主要有 CO_2 、 CO 、 N_2 、 O_2 等气体, N_2 不参加反应,故 CO_2 、 O_2 含量变化可以反映出火烧油层的不同阶段。如果凭借单一监测指标的变化来判断火烧油层的状态往往会出现偏差,所以用多条产出气体曲线综合判断的方法来实现。为了更加详细地刻画不同的反应阶段,引入 O_2 含量导数 $\varphi'(\text{O}_2)$ 的概念,定义如下:

$$\varphi'(\text{O}_2) = \frac{\Delta\varphi(\text{O}_2)}{\Delta t} = \frac{\varphi(\text{O}_2)_n - \varphi(\text{O}_2)_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi(\text{O}_2)$ 为 O_2 含量变化; Δt 为时间, min; $\varphi(\text{O}_2)$ 为 O_2 体积分; n 为时间序列, $n=1, 2, \dots$ 。

如果 $\varphi'(\text{O}_2)$ 趋于0,那么可以认为 O_2 在系统中含量稳定,稳定燃烧和燃烧结束时都会出现这种情况; $\varphi'(\text{O}_2)$ 急剧变化是因为燃烧发生了变化,点火阶段会出现这种现象。这样根据 O_2 含量、 $\varphi'(\text{O}_2)$ 的曲线变化转折点来划分燃烧阶段。选取系统预热 $230 \text{ }^\circ\text{C}$ 室内试验,绘制包括 $\varphi(\text{O}_2)$ 、 $\varphi'(\text{O}_2)$ 、 $\varphi(\text{CO}_2)$ 变化的曲线(图2)。

根据曲线综合特征把火烧油层划分为5个典型阶段。

通风阶段(I):这一阶段中,注入端连续注入空气, O_2 和原油接触面积增大,但是还没有开始火烧油层的化学反应,故 $\varphi(\text{CO}_2)$ 很少。产出端检测到 $\varphi(\text{O}_2)$ 逐渐上升,并在一段时间保持平稳, $\varphi'(\text{O}_2)$ 为大于0的凸起状。

点火阶段(II):在这一阶段中实现了火烧油层反应的开始到稳定。 $\varphi(\text{CO}_2)$ 逐渐上升,表明火烧油层的化学反应已经开始。 $\varphi(\text{O}_2)$ 迅速下降, $\varphi'(\text{O}_2)$ 为小于0的下凹状,两条曲线都趋近于0时就是火烧油层反应趋于稳定的时候。所以这一阶段的分界点就确定在两条曲线都趋近于0的时候。通过试验发现 φ

(O₂)在10%以上就是比较稳定的燃烧状态,所以也可以用CO₂含量为10%作为该阶段结束的标志。

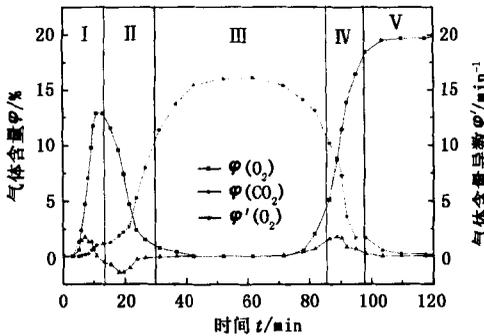


图2 火驱阶段划分
Fig.2 In situ combustion stage divide

稳定阶段(III):经历了点火阶段,火烧油层已经进入了稳定燃烧阶段,这一阶段明显的特征是φ(O₂)和φ'(O₂)都趋近于0,而φ(CO₂)约为15%。

衰减阶段(IV):随着燃烧反应的不断进行,燃料消耗殆尽,燃烧前缘到达产出端。这一阶段的气体监测曲线特征和第二阶段相反,φ(CO₂)逐渐下降,因为燃料不足,逐渐多的O₂在产出端产出。φ'(O₂)为大于0的凸起状,这一阶段的开始也界定在φ(O₂)=10%。

熄灭阶段(V):这是火烧油层结束后的状态,这一阶段的主要特征是各条曲线都是常数,不随时间变化。

3 燃烧状态影响因素

在整个火烧油层过程中CO和CO₂是燃烧的主要产物,不同的燃烧阶段有不同的含量特征,N₂不参与反应,这里引入气体指数(I_g)作为燃烧阶段的辅助判断指标:

$$I_g = \frac{\varphi(\text{CO}+\text{CO}_2)}{0.269\varphi(\text{N}_2)-\varphi(\text{O}_2)} \quad (2)$$

式中,φ(CO+CO₂)为产出气体中CO和CO₂的体积分数;φ(N₂)为注入气体中N₂的体积分数。

该气体指数体现了实际产出废气和理论产出废气的比值,在火烧油层的初始阶段,因为没有生成CO₂,所以I_g=0;随着化学反应的进行,I_g值逐渐增大,在火烧油层稳定燃烧阶段,产出端I_g会趋近于某一定值;在火烧油层的结束阶段I_g会逐渐下降到0(图3)。可以简单地认为I_g增大阶段是火烧油层点燃阶段,I_g减小阶段是火烧油层熄灭阶段。

如果稠油完全以碳为主要成分,那么最终产物中没有H₂O,燃烧稳定时供应燃烧的O₂(I_g表达式

分母项)完全生成了CO和CO₂,显然此时I_g值等于1。如果稠油中主要成分是长链的碳氢化合物,近似用(CH₂)_n表示,那么就要生成部分水,I_g值就会小于1,经测算完全长链为主的稠油稳定燃烧时气体指数I_g约为0.66。某次试验测得I_g最高值达0.8,介于0.66和1之间,间接地说明了反应物中焦炭和长链烃各占一定比例。

3.1 预热温度

根据化学反应动力学的阿累尼乌斯公式可知,环境温度对燃烧反应速度有很大影响。为此设定其他试验条件不变,设计了5个不同预热温度(θ)下的燃烧试验。观察燃烧管内部温度场及产出气体组分的变化,结果见图3。

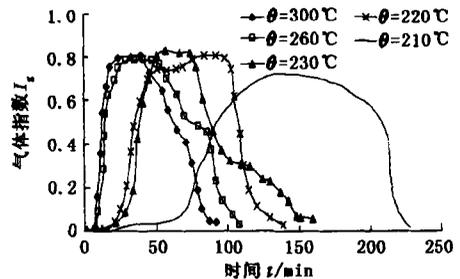


图3 不同预热条件下点火试验

Fig.3 Igniting test under different preheat conditions

不同预热温度下,试验完成时间、氧气开始迅速下降的时间、最高燃烧温度都有很大差异。可以看出,随着预热温度的不断上升,会出现通气阶段(I)明显缩短甚至缺失,快速进入稳定燃烧阶段(III),在此阶段经历时间也随着预热温度的提高而缩短,220~300℃时气体指数最高值相当,说明改变预热温度不能使燃烧反应发生本质上的变化,只改变了反应的进程,随后的衰减段和熄灭段还会出现。

3.2 助燃剂

点火之前在燃烧管内加入适量金属盐助燃剂,图4是加入助燃剂与未加助燃剂点火过程的对比。

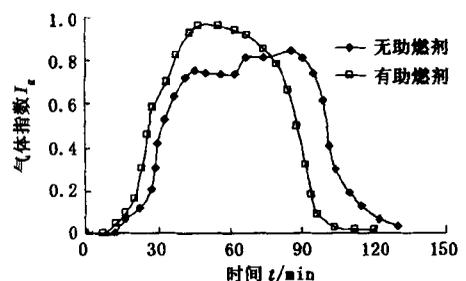


图4 助燃剂对燃烧状态的影响

Fig.4 Influence of combustion adjvant on combustion status

在系统预热 230 °C 时,加助燃剂后的燃烧反应较不加助燃剂具有以下特点:燃烧阶段启动快,气体指数高,反应速度快。比较高的气体指数也说明加入助燃剂使燃烧反应更为剧烈,反应物主要以焦炭为主。以上特征都表明助燃剂对调高点火成功率、改善燃烧状态有积极作用。

4 应用分析

Du66 块位于断鼻构造的最高部位,埋藏深度为 1.116 ~ 1.298 km,原始地层压力为 10.82 MPa,目前地层压力为 1.05 MPa,油藏温度为 42.3 °C。原

油黏度为 1.36 Pa · s,原油密度为 0.968 g/cm³。1985 年之前利用自然能量采油,产量很低,1987 年进入全面蒸汽吞吐热采,截至 2005 年平均吞吐周期 8.7 周期,井组采出程度 15.25%。2005 年首次在 Du66 北块行了火烧油层先导试验,先后实施了 6 个井组的火烧油层先导试验,取得了明显的增油效果。

为了把实验室的分析结论推广到油田实际火烧油层过程中,选取两口生产井的气体监测数据,采样频率设定在 5 ~ 10 d 收集和分析一次,绘制气体指数曲线,结果见图 5。

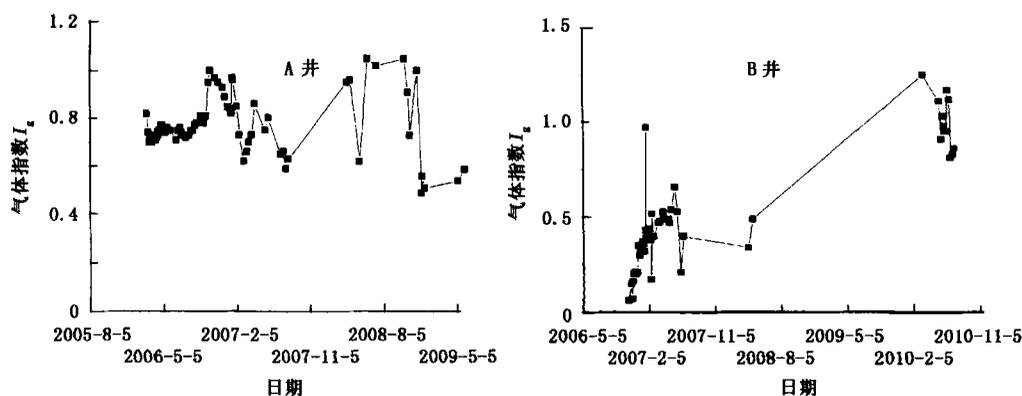


图 5 生产井产出气体监测数据气体指数变化

Fig. 5 Variation of gas index of gas monitoring data in production wells

从图 5 中可以看出, A 井气体指数在 2009 年 5 月前基本稳定在 0.7 ~ 1.0,说明该生产井方向上燃烧稳定,但是 2009 年 5 月后出现了下降趋势,应该密切监测该井的状态,综合分析其是否有燃烧突破发生。B 井在 2007 年 2 月到 2008 年 8 月前,气体指数一直处于较低水平,说明该井方向上燃烧不稳定,结合油藏地质分析发现该井处于边滩内,注入气体在该井方向上分配不足,2008 年 8 月后才有所改善,目前正处于稳定燃烧状态。

5 结论

(1) 利用火烧油层过程中 O₂ 含量导数可以反映气体含量的细微变化,是划分燃烧阶段的重要辅助指标,气体指数和产出气体含量组合曲线可以作为判断火烧油层燃烧阶段和燃烧状态的依据。

(2) 在火烧油层稳定燃烧阶段,产出端气体指数一般为 0.66 ~ 1,低于 0.66 则燃烧状况不好,甚至灭火($I_g = 0$)。不同的试验和现场条件会出现组合曲线的部分阶段不明显或缺失,但是根据典型曲线总结的判断依据依然有效。

(3) 火烧油层的各个阶段体现在组合曲线上有

不同的特征,结合火烧油层现场监测数据分析该试验井组处于稳定燃烧阶段,判断方法简单明确,可以顺利地把实验室结论推广到油田现场。

参考文献:

- [1] 张敬华,王双虎,王庆林. 火烧油层采油[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- [2] 宁奎,袁士宝,蒋海岩. 火烧油层理论与实践[M]. 东营. 石油工业出版社,2010.
- [3] 袁士宝,蒋海岩. 基于支持向量机的火烧油层效果预测[J]. 石油勘探与开发, 2007, 27(1): 69-71.
YUAN Shi-bao, JIANG Hai-yan. Effect prediction of in-situ combustion based on support vector machine[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 27(1): 69-71.
- [4] 关文龙,王世虎,曹钧合,等. 郑 408 块火驱物理模拟结果与模型解析解差异分析[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(1): 87-89.
GUAN Wen-long, WANG Shi-hu, CAO Jun-he, et al. Analysis for difference between laboratory experiment results and analytical model solution of in-situ combustion in Zheng 408 block[J]. Petroleum Geology and Recovery

Efficiency, 2006,13(1):87-89.

[5] 袁士宝,蒋海岩. 火烧油层试验的压力时频分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(2):80-84.
YUAN Shi-bao, JIANG Hai-yan. Analysis of in situ combustion experiment with pressure time-frequency [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(2):80-84.

[6] 赵东伟,蒋海岩,张琪. 火烧油层干式燃烧物理模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2005,27(1):36-39.
ZHAO Dong-wei, JIANG Hai-yan, ZHANG Qi. Dry combustion physical modeling of in-situ combustion[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(1):36-39.

[7] 王艳辉,陈亚平,李少池,等. 火烧驱油特征的实验研究[J]. 石油勘探与开发,2002,27(1):69-72.
WANG Yan-hui, CHEN Ping-ya, LI Shao-chi, et al. Experiment study on oil displacement by in situ combustion [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002,27(1):69-72.

[8] SHOWALTER W E. Fireflood at Brea-Olinda field, Orange County, California[R]. SPE 4763,1974.

(编辑 李志芬)

下 期 要 目

唐明明,等	基于随机扩展有限元模拟的裂缝建模方法
刘清俊,等	塔里木盆地志留系柯坪塔格组砂岩成岩作用与成岩相
封从军,等	扶余油田中区泉四段储层非均质性及对剩余油分布的影响
方 洋,等	稠油水平井溶剂辅助重力驱数学模型
史玉才,等	大型丛式井组井口分配模型及自适应遗传算法求解方法
王晨晨,等	基于格子玻尔兹曼方法的碳酸盐岩数字岩心渗流特征
魏 纳,等	液基全过程欠平衡钻井停止循环连续气侵井筒瞬态流动规律
刘延鑫,等	海底管道局部冲刷数值模拟分析
张浦阳,等	吸力锚平台沉放过程中施工仿真技术
许道振,等	积水在上倾输油管中运动状态研究
宋 华,等	Ag/TiO ₂ -NaY 吸附苯并噻吩热力学和动力学研究
孔庆池,等	氰酸钠合成工艺的优化
王友启,等	陆相特高含水油田固水提高采收率机制
李奕川,等	乙腈为溶剂的丙烯直接环氧化连续反应
葛新民,等	岩石核磁共振 T ₂ 谱与电阻率指数的对应性研究