

# 火烧油层点火室内实验分析及现场应用

袁士宝<sup>1</sup>, 孙希勇<sup>2</sup>, 蒋海岩<sup>3</sup>, 宁奎<sup>2</sup>, 张弘韬<sup>2</sup>, 张庆云<sup>4</sup>

(1. 西安石油大学石油工程学院 陕西 西安 710065; 2. 中国石油辽河石油管理局火驱项目部, 辽宁 盘锦 124000; 3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 4. 中国石油玉门油田分公司钻采工程研究院, 甘肃 酒泉 735019)

**摘要:** 火烧油层是一项重要的稠油开采方式, 日益成为蒸汽吞吐后稠油开发的重点接替技术之一。点火是火烧油层过程中的首要环节, 为了考察油藏条件对点火燃烧的影响, 提高点火的热效率和成功率, 利用燃烧管实验研究了不同预热温度(210、220、230、260和300℃)、不同注气速度(3和0.188 L/min)以及助燃剂对原油点火及燃烧过程的影响。实验结果表明, 在满足一定通风强度的基础上, 高预热温度有利于油层快速点燃, 助燃剂可以改善原油燃烧状态。在辽河油区杜66北块火烧油层的矿场试验中, 采用注蒸汽预热地层和助燃剂2种点火助燃技术, 截至2011年底, 该区块空气油比达到1.696 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 累积增油量超过1.3 × 10<sup>4</sup> t, 创经济效益超过1 000 × 10<sup>4</sup>元。

**关键词:** 室内实验 火烧油层 预热 助燃剂 点火 热力采油

中图分类号: TE357.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2012)04-0053-03

火烧油层是一种具有明显技术优势和潜力的稠油热力开采方式<sup>[1]</sup>, 该技术能够有效地改善原油在地下的流动性, 提高采收率, 具有很多其他热采方法无法比拟的优势。已经陆续出现了关于火驱方式分类<sup>[1]</sup>、实验技术<sup>[2-6]</sup>、筛选标准<sup>[7]</sup>以及效果预测<sup>[8-11]</sup>等相关的一整套技术, 中国近期主要把火烧油层作为稠油油藏蒸汽吞吐后期的接替开发手段<sup>[12-13]</sup>。点火是火烧油层过程中的首要环节, 但传统电点火方式存在热效率低、成功率低的缺点<sup>[14]</sup>, 为了研究蒸汽预热点燃油层的可行性, 利用燃烧管实验研究了预热温度、注气速度和助燃剂对原油点火的影响。

## 1 实验装置及过程

燃烧管是火烧油层实验的关键设备。此次实验燃烧管模型(图1)长度为0.3 m, 内径为0.06 m, 沿轴向布置4个热电偶, 燃烧管外部有3个电热器控温热电偶, 小管燃烧管模型具有管外跟踪管内温度的功能, 控制系统依据管外补偿热电偶和管内热电偶测出的温度, 控制管外加热器的加热量使管壁内外的温度基本相同, 保证管内的热量不向管外散失, 模拟油藏绝热状态。在模型外安装点火电炉, 空气注入后根据第1个热电偶的温度值将空气加热到设

定点火温度。产出油水与烟道气一起从出口排出, 与燃烧釜一样, 利用产出流体采集系统, 计量产油、产水和产气量, 并且分析产出气体中各主要组分的含量。

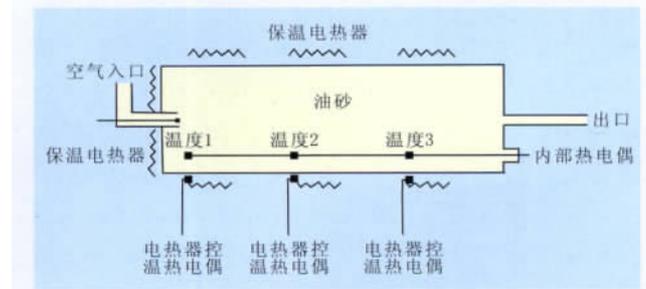


图1 燃烧管模型示意

实验时, 首先按照一定的粒径组合、含油饱和度配制油砂, 填入燃烧管并压实; 向燃烧管通氮气, 对系统油砂加热到预设温度; 按照设定注气速度向燃烧管通空气, 记录燃烧管内的温度场变化、注气压力和产出气体组分等数据, 最后对实验数据进行分析。

## 2 燃烧实验及影响因素

### 2.1 预热温度

化学反应动力学的阿累尼乌斯公式表明, 对于

收稿日期: 2012-05-15。

作者简介: 袁士宝, 男, 博士后, 从事热采及油藏管理方面的研究。联系电话: (029) 88382673, E-mail: upcysb@126.com。

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目“低渗油田高压注空气过程中原油氧化反应干预研究”(11JK0782), 西安石油大学博士启动基金项目

地下的燃烧化学反应,温度升高时,反应速度常数会增大,同样,温度对原油氧化强度也有很大的影响。为此进行了不同预热温度下的点火实验。实验中油砂的配制和注气速度相同,改变预热温度,观察燃烧管内部温度场的变化及产出气体组分的变化。

燃烧管的预热温度分别为 210、220、230、260 和 300 °C 等 5 组点火实验中,烧完时间从 210 °C 的 225 min 缩短到 300 °C 的 90 min,氧气开始迅速下降的时间和最高燃烧温度都有很大差异(图 2)。

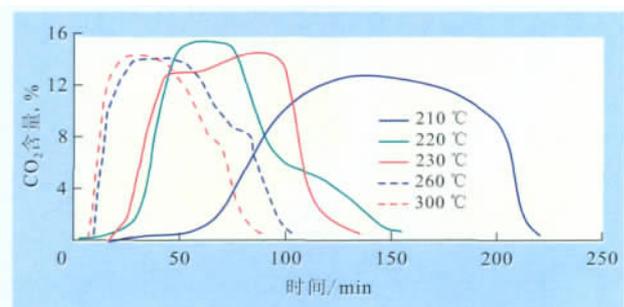


图 2 不同预热温度下的点火实验结果

产生烧完时间差异的原因是:①由于预热温度不同,氧化反应强度不同,积蓄热量达到结焦物燃烧门槛温度的时间也不同,实际上在氧气急剧下降的时刻,已经接近门槛温度,在此后很短时间内结焦物燃烧起来达到很高的温度;②由于达到结焦物燃烧的时间不同,结焦物形成的数量不同,从图 2 可见,预热温度低,不但氧气开始迅速下降的时间长,后面到达烧完的时间也长。

预热温度与空气消耗量的实验结果表明,当预热温度为 210 °C 时,空气消耗量为 473.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;随着预热温度的升高,空气消耗量逐渐下降;当预热温度为 260 °C 时,空气消耗量为 348.4 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;当预热温度 300 °C 时,空气消耗量为 278.9 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;而 210 °C 时加入催化剂后,空气消耗量为 345 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,相当于预热温度 260 °C 下的情况。空气消耗量是实际参与燃烧的空气量(大气压下的体积)与燃烧过的单位体积油砂的比值,即每立方米油砂燃烧实际消耗空气的量。

### 2.2 注气速度

由于燃烧管预热的范围比较大,大量空气注入不会使预热区温度降低,空气注入量足够大,可以产生足够大的热量,使氧化区的温度快速上升,直至达到门槛温度,使结焦物燃烧。

在实验中采用了 2 个注气速度,分别为 3 和 0.188 L/min,相当于通风强度为 50 和 4 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)。在矿场火烧油层正常通风强度范围内。

当通风强度为 4 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)且预热温度为 330 °C 时,氧气可以全部消耗,但模型内温度基本没有升高,更没有达到燃烧。通风强度为 50 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)时点火,如果预热温度为 330 °C,则可以在 10 min 之内形成燃烧。因此,点火时通风强度一定不能过低。

预热后,以不同的通风强度向厚度为 10 m 的油层注气点火时,计算距离油井中心 0.5 m 处圆形剖面的通风强度,此处已经进入油藏深部,套管的散热等因素影响已较小,可形成燃烧。由计算结果可知,当注气速度为 4 m<sup>3</sup>/min 时,通风强度为 8 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>);当注气速度为 16 m<sup>3</sup>/min 时,通风强度为 31 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>),还未达到实验中的理想值 50 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>),但是由于射孔的孔眼较小,注入空气在这个部位还没有全部扩散,即在孔眼附近空气流速较大,因此在距油井中心 0.5 m 处的圆形剖面,孔眼附近的通风强度应该大于平均通风强度一倍以上,这样在点火时以 12~15 m<sup>3</sup>/min 的速度注入空气,基本可以保证足够的通风强度。

### 2.3 助燃剂

为了增强火烧油层过程中的原油氧化作用,缩短点火时间,应用了助燃剂点火技术,即在点火之前适量加入助燃剂。助燃剂由碱金属化合物以及过渡金属化合物组成,具有提高燃料燃烧效率,降低原油燃点和加快燃烧速度的作用。将加入助燃剂后与未加助燃剂的点火过程进行了对比。结果(图 3)表明,当预热温度为 210 °C 且不加助燃剂时,点火效果

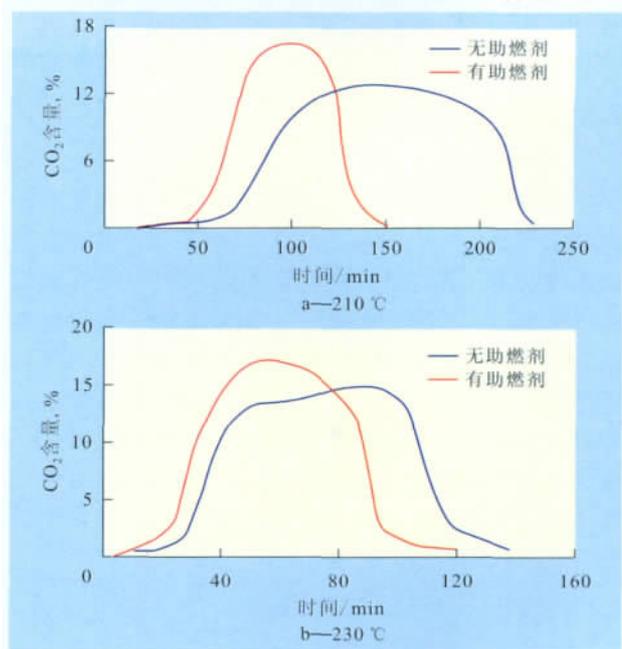


图 3 不同预热温度下助燃剂的影响

很差,加入助燃剂后效果明显好转,比预热温度为220℃的点火效果还好,氧气消耗得很彻底,烧完时间比预热温度为220℃的还少。

由图3可见,在相同的预热温度下,加助燃剂的点火效果好;在加入助燃剂的情况下,预热温度高则点火效果更好。其原因是加入助燃剂可以保证进入正常的燃烧过程。

### 3 现场应用

实验证明油层预热能改善原油的燃烧状态,将其推广到现场试验就是:采用注蒸汽预热来提高油层温度,然后注空气在油层形成自燃的点火方式。这与电加热点火方式有很大的不同。

由于被加热的油藏体积相当大,如果注入空气量比较大,可以在已加热油层中发生氧化。在温度较低时,吸收氧分子生成醇、酸、酮、醛等物质,形成焦碳类物质。氧化生热使温度提高,温度提高使氧化更剧烈,生热更多,这种加速氧化反应可以导致温度迅速增加,到达门槛温度之前,属于低温氧化,油藏中结焦,到达门槛温度之后,结焦物燃烧起来,完成点火过程。

在辽河油区杜66北块火烧油层矿场试验中,采用注蒸汽预热—助燃剂点火助燃技术。首先,通过注蒸汽管道向油层注入温度超过350℃的蒸汽300 m<sup>3</sup>,以预热近井地带,蒸汽停注后投放助燃剂1~2 m<sup>3</sup>,待油井内原油与空气产生氧化放热作用时,再向井内注入空气,注入量为 $1 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,连续注入6~7 d后,生产井监测到CO<sub>2</sub>产出,而且达到了稳定燃烧状态,表明预热—助燃剂技术是一项简便、有效的火烧油层点火技术。截至2011年底,该区块空气油比达到1 696 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,累积增油量超过 $1.3 \times 10^4$  t,创经济效益超过 $1 000 \times 10^4$ 元。

### 4 结论

室内实验及现场应用表明,预热油层自燃点火方式确实可以点燃油层,而且预热温度越高越好,在

预热温度为300℃时注空气,与低于其的预热温度相比,燃烧指标明显较好;当预热温度为210℃时,燃烧过程急剧变差;在点火时以12~15 m<sup>3</sup>/min的速度注入空气,基本可以保证足够的通风强度;加入助燃剂可以改善点火过程,保证进入正常的点火过程。

#### 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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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.
- [6] Elkins, Lincoln F, Morton, et al. Experimental fireflood in a very viscous oil - unconsolidated sand reservoir, S E Pauls Valley Field, Oklahoma [R]. SPE 4086, 1972.
- [7] 宁奎,袁士宝,蒋海岩.火烧油层理论与实践[M].东营:中国石油大学出版社,2010.
- [8] 张毅,谢志勤,王弥康,等.预测火烧油层开发参数的工程计算方法[J].油气地质与采收率,2001,8(1):48-50.
- [9] 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.
- [10] 马代鑫,刘慧卿,邵连鹏,等.火烧油层注气井试井分析理论模型[J].油气地质与采收率,2006,13(5):72-74.
- [11] 柳兴邦,李伟忠,李洪毅.强水敏稠油油藏火烧驱油开发试验效果评价——以王庄油田郑408块沙三段油藏为例[J].油气地质与采收率,2010,17(4):59-62.
- [12] 朱玉瑰,宁奎,张成军,等.一种火驱采油油层热力点火方法:中国,ZL200610134965.5[P].2009-11-18.
- [13] 李迎春,邱国清,袁明琦,等.乐安油田南区火烧驱油提高采收率试验[J].油气地质与采收率,2002,9(4):72-74.
- [14] 王艳辉,朱志宏,李桂霞.克拉玛依油田火驱开发参数的数值模拟研究[J].油气采收率技术,2000,7(1):10-12.

编辑 刘北羿

China

**Tong Minbo, Gao Fei, Li Chunxia et al. Pre-stack density inversion in reservoir and hydrocarbon prediction application in Yong block, Subei Basin. *PGRE*, 2012, 19(4):42–45.**

**Abstract:** Yong block is located in the center of Dongtai depression in north Subei Basin, and its reservoir type is complex and diverse. This paper predicts reservoir and hydrocarbon in study area using pre-stack seismic inversion method which is used to guide the rock-physics analysis. With log data correction and standardization, the log curves perform the real stratigraphic rock characteristics, and then carry out the effective stratigraphic correlation to ensure the accuracy of geological understanding. With different lithology and fluid rock-physics sensibility analysis, we distinguish reservoir sands and hydrocarbon, and then identify the best parameter for pre-stack inversion. According to system analysis of elastic parameters of seismic rock physics, and aimed at the complex reservoir characteristics in study area, we combine the rock-physics analysis with pre-stack seismic inversion technology and using approximate Zeoppritz equation method to predict the reservoir sands and hydrocarbons. Finally, combined the well with seismic correction, the results indicate that: pre-stack inversion results can predict reservoir sands distribution well, because of the limit of reservoir itself complexity, hydrocarbons prediction can't exhibit its distribution characteristics completely. The next step of oil and gas exploration should enhance the study of sedimentary facies and sequence stratigraphy.

**Key words:** petrophysics; sensitivity; pre-stack seismic; density inversion; hydrocarbon prediction

**Tong Minbo**, Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd, Xi'an City, Shaanxi Province, 710075, China

**Wang Jun, Lü Xiaowei, Wang Lixin. Model-based relative-amplitude-preserved estimation methods and application of seismic processing technology. *PGRE*, 2012, 19(4):46–49.**

**Abstract:** Now, there are few effective methods in the relative amplitude preserved estimation of seismic processing technology. It is difficult to evaluate the amplitude-preserved feature using real seismic data, which are affected by many factors such as noise, surface condition, and so on. Based on model data, four kinds of amplitude-preserved estimation methods are proposed, including amplitude statistics curve, residual difference, amplitude ratio and AVO attribute-preserved method. In addition, using model data, the amplitude-preserved features of some key processing techniques are estimated by means of methods mentioned above. By the estimation result, processing parameters and flows can be optimized for geometrical spread compensation, predictive deconvolution and surface consistent amplitude compensation techniques. In consequence, the research is very useful for the improvement of amplitude-preserved of seismic processing results.

**Key words:** forward model data; relative amplitude preserve; residual difference; amplitude curve; deconvolution; amplitude compensation

**Wang Jun**, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing City, 100871, China

**Song Xinwang, Li Zhe. Study on seepage characteristics of hydrophobic associated polymer in porous media. *PGRE*, 2012, 19(4):50–52.**

**Abstract:** In order to know whether the hydrophobic association polymer can keep high effective viscosity during migration in porous media, different types of hydrophobic association polymer solution character evaluation and physical simulation test are discussed in the paper to give guidance to the field application. The viscosifying performance is tested for different types of polymer solution with different concentration and shear rate. It shows that hydrophobic association polymer has better viscosifying performance than traditional HPAM in high concentration, but shear rate takes great effect on its pseudo-viscosity. It also shows that ultra high molecular weight hydrophobic association polymer with high molecular weight and some degree of association action performs well viscosifying capacity and even pressure transmitting character in porous media by the test of effective apparent viscosity, flow migration characteristic and displacement characteristics. It perhaps has well application feasibility as oil displacement agent. And, the traditional hydrophobic association polymer with its viscosity generation mainly depending on intermolecular association action perhaps should be further improved as oil displacement agent.

**Key words:** hydrophobic association polymer; viscosity; porous media; filtering flow; injection pressure; displacement performance

**Song Xinwang**, College of Chemical Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China

**Yuan Shibao, Sun Xiyong, Jiang Haiyan et al. Ignition experimental analysis of in-situ combustion under condition of preheating. *PGRE*, 2012, 19(4):53–55.**

**Abstract:** In-situ combustion is an important way of development mode on heavy oil reservoir, and it is increasingly becoming one of the key replacing technologies after steam soaking. Ignition is the first link in the process of in-situ combustion, in order to examine the different impact of reservoir conditions on ignition combustion and improve the thermal efficiency and success rate of ignition, the impacts for crude oil of different preheating temperature (210 ~ 300 °C), different flow rate and combustion adjuvant with combustion tube experiments are studied. It concluded that, based on a certain air flux, high preheating temperature is beneficial to reservoir fast ignition, and combustion adjuvant can improve the combustion status of crude oil. For in-situ combustion test, preheating, combustion adjuvant technology is a simple and effective combustion ignition technology, so it is worthy of promotion and application.

**Key words:** laboratory experiment; in-situ combustion; preheating; combustion adjuvant; ignition; thermal recovery

**Yuan Shibao**, College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shannxi Province, 710065, China