

文章编号: 1000-0747(2012)06-0720-08

# 水平井火驱辅助重力泄油燃烧前缘展布与调控

梁金中<sup>1,2</sup>, 关文龙<sup>1,2</sup>, 蒋有伟<sup>1,2</sup>, 席长丰<sup>1,2</sup>, 王伯军<sup>1,2</sup>, 李晓玲<sup>1,2</sup>

(1. 提高石油采收率国家重点实验室; 2. 中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 国家科技重大专项“火烧驱油技术研究与应用”(2011ZX05012-002)

**摘要:** 通过三维物理模拟实验研究水平井火驱辅助重力泄油过程中不同阶段燃烧前缘和结焦带的展布规律, 并分析各阶段燃烧前缘稳定推进机理及影响因素。燃烧前缘的扩展可分为点火启动、径向扩展和向前推进 3 个阶段。点火启动阶段, 油层上部最先实现点火, 点火温度、点火时间和注气速率是该阶段的关键操作参数。径向扩展阶段, 燃烧前缘呈“漏斗状”继续向四周和下部扩展, 此时调控的关键在于注气速率与燃烧前缘的面积相匹配。燃烧前缘推进到水平井趾端射孔段后, 以一定的倾角朝水平井跟部方向推进, 超覆式燃烧和结焦带对水平井筒的封堵是该阶段实现稳定泄油的重要原因。在矿场试验中, 应从井网模式、点火参数和注采制度等方面采取优化措施来维持燃烧前缘的稳定推进。图 11 参 16

**关键词:** 火驱辅助重力泄油; 水平井; 燃烧前缘; 展布特征; 物理模拟

中图分类号: TE345

文献标识码: A

## Propagation and control of fire front in the combustion assisted gravity drainage process using horizontal wells

Liang Jinzhong<sup>1,2</sup>, Guan Wenlong<sup>1,2</sup>, Jiang Youwei<sup>1,2</sup>, Xi Changfeng<sup>1,2</sup>, Wang Bojun<sup>1,2</sup>, Li Xiaoling<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration &amp; Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The propagating characteristics of combustion fronts and coke zones in the combustion assisted gravity drainage process were studied using 3D physical simulation experiments. The main mechanisms and factors affecting stable propagation of the combustion fronts were discussed. The experimental results show that the propagation of combustion front can be divided into startup stage, radial expands stage and moving forward stage. The top oil layer is ignited first at the startup stage. Ignition temperature, ignition time and air injection rate are the key parameters for successful ignition. At the radial expanding stage the combustion front grows in size and expands radically and downwards like a funnel, and the air injection rate should match the area of combustion front. After the combustion front propagates beyond the “toe” position, the burning zone would advance along the horizontal well at a certain angle. The controlled gas override and gas seal of the coke in the horizontal well contributes significantly to the overall stability of the process. In field pilot testing, well pattern, ignition parameters and regime of injection and production should be optimized to ensure the stable propagation of the combustion front.

**Key words:** combustion assisted gravity drainage; horizontal well; combustion front; propagating characteristic; physical simulation

## 0 引言

水平井火驱辅助重力泄油技术是一项新的稠油开发技术<sup>[1-2]</sup>, 它将水平井技术与火烧油层技术相结合, 突破了火驱技术应用的地层原油黏度上限, 扩展了火驱技术应用的油藏范围<sup>[3-6]</sup>, 有望在厚层特稠油、超稠油开发中发挥重要作用。

国内对该技术的研究起步较晚, 目前相关报道很少。而国外学者主要针对其泄油机理、原油采收率、原油改质情况和布井方式等进行研究<sup>[5-11]</sup>, 对泄油过程中燃烧前缘的三维展布特征、调控的关键参数和调控方法研究较少, 特别是关于可能出现的风险<sup>[12]</sup>及如何

防范这些风险还没有研究报道, 这必将限制该技术在矿场的应用和推广。

针对以上情况, 笔者通过三维物理模拟实验研究水平井火驱辅助重力泄油过程中不同阶段温度场和结焦带的展布规律, 分析各个阶段的关键操控参数和燃烧前缘稳定推进机理, 对实现稳定泄油、避免燃烧带沿水平井突进具有指导意义。

## 1 实验装置与实验方法

### 1.1 物理模拟实验装置

三维火驱物理模拟实验系统由注入系统、产出系统、测控系统及模型本体 4 部分构成<sup>[12]</sup> (见图 1)。注

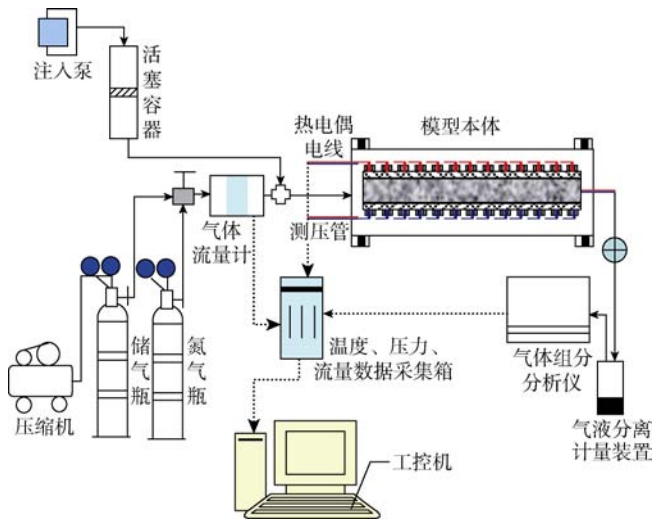


图 1 三维火驱物理模拟实验系统示意图

入系统包括注入泵、活塞容器、空气压缩机、流量计、气瓶；测控系统对温度、压力、流量信号进行采集、

处理，包括硬件和软件；产出系统主要完成对模型产出流体的分离、计量。模型本体为三维填砂模型，模型外部设有保温加热装置，内部均匀排布 4 层热电偶，经过软件反演可以得到油层中任意温度剖面，通过温度剖面可以判断燃烧带前缘的展布规律。

本实验装置设计了 2 种规格的模型本体，布井方式如图 2 所示。模型本体（见图 2a）的三维尺寸为 400 mm×400 mm×150 mm，模型侧壁内部中间位置设置 1 口垂直注气井（内置点火器），模型底部设置 1 口水平生产井，水平井的趾端与注气井的垂直距离为 50 mm。模型本体（见图 2b）的体积为模型本体 体积的 1.5 倍，三维尺寸为 600 mm×400 mm×150 mm，注气井位置向模型内部移动了 100 mm，水平生产井仍设置于模型底部，水平井的趾端与注气井的垂直距离也 为 50 mm。

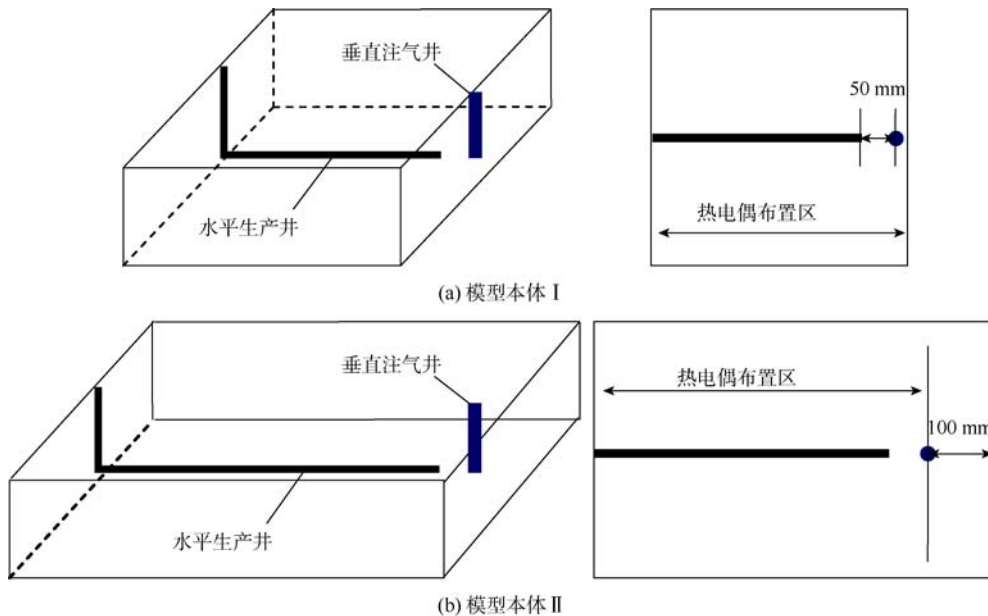


图 2 三维火驱模型内部各井排布及其对应的井网

此前的实验在注气井全井段射孔，出现了燃烧带沿水平井筒突进并严重烧毁水平井筒的情况<sup>[13]</sup>，因此，在本系列实验中，注气井只在油层上部 1/2 段射孔，水平井的水平段全部射孔。

### 1.2 实验方法

三维火驱实验包含以下几个步骤。①实验准备。根据目标区油藏地质特征，设计室内模型的孔隙度、渗透率、饱和度等参数。在此基础上进行岩心及流体准备、物性测试、传感器标定、点火器检测等工作。②模型装填。包括模拟井/点火器安装、传感器安装、模型系统试压、油层岩心装填、饱和水与饱和油等。

本系列实验采用实际地层原油为模拟油，50 ℃下脱气原油黏度为 12 090 mPa·s，在实际地层温度 18 ℃下为超稠油。装填后的模型为均质模型，孔隙度 39%，含油饱和度 84%。③火驱实验。首先，启动点火器预热，一般情况下先向模型中注入氮气，主要是防止油层在被点燃之前先行氧化结焦；然后逐渐加大氮气的注入速度，直到点火井周围一定区域的温度达到某一特定值时（一般 350 ℃以上），改注空气实现层内点火。整个火驱实验一般包括低速注气点火、逐级提速火驱、稳定火驱、停止注气结束火驱 4 个阶段，注气压力控制在 0.6~0.8 MPa，注气速率调控在 5~20 L/min。

## 2 三维火驱物理模拟实验

### 2.1 利用模型本体 I 的实验

利用模型本体 I 研究点火初期燃烧带的展布特征。预热结束后以 5 L/min 的速率转注高温空气,油层的中上部最先实现点火,在开始的 1 h 内火线推进较快,但由于此时高温燃烧区范围较小,水平井只有少量油产出且产油不连续,此阶段为火驱辅助重力泄油的启动阶段。之后燃烧前缘逐渐沿水平井方向及水平

井两侧方向缓慢扩展,火线扩展的过程中逐渐增大注气速率。在点火 1.5 h 后,水平井出现连续泄油,泄油速度约为 8 mL/min,火线继续沿水平井方向及水平井两侧方向稳定扩展,其中油层中上部火线推进速度比中下部要快。注气速度达到 12 L/min 时,燃烧前缘能以一定的倾角向前稳定推进,最高温度可达 600 °C 以上(局部瞬间可达 800 °C),平均 450~550 °C。图 3 展示了预热结束后到准备点火前、点火后 1.5 h 和点火后 4.5 h 油层上、中、下 3 层的温度场。

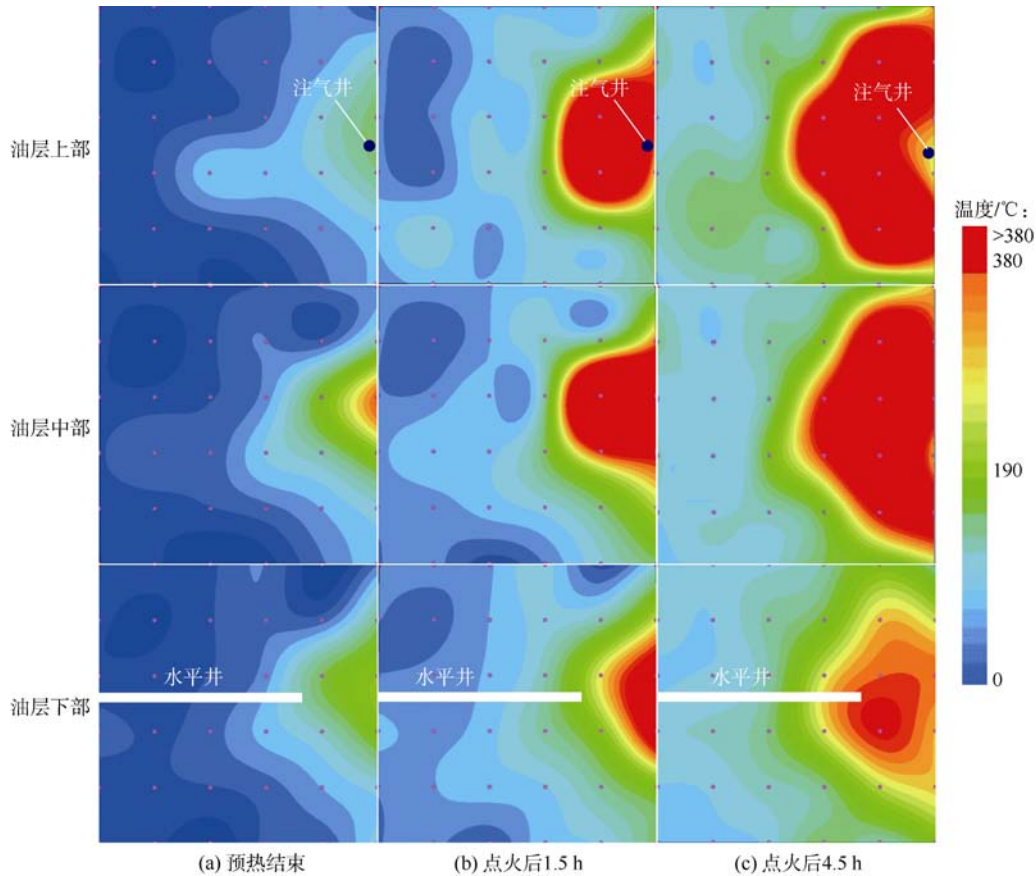


图 3 不同时间油层平面温度场

为了研究点火初期燃烧前缘展布特征,利用模型本体 I 共进行了 2 次实验,分别在点火启动成功后(产出气中  $\text{CO}_2$  含量大于 8% 且稳定连续产出,  $\text{O}_2$  利用率在 95% 以上,视为点火启动成功)和燃烧带推进到水平井趾端射孔段时,向模型中注入氮气灭火,中止实验。燃烧前缘之前的结焦带在实验中止后能完整保留下来,且其形状能准确反映实验中止前燃烧带的形状<sup>[14]</sup>。将结焦带的形状与温度场变化相结合,可以较准确地判断燃烧前缘在模型油层中的推进情况,因此实验中止后拆开模型本体,对结焦带进行观察分析。

图 4 为 2 次实验结束后拆开模型并清除了未燃油砂的结焦带照片,其中图 4a 和 4c 分别为点火启动成

功后结焦带俯视图和沿水平井方向的侧视图,图 4b 和 4d 为燃烧带推进到水平井趾端射孔段时结焦带的俯视图和沿水平井方向的侧视图。从点火启动到燃烧带推进到水平井射孔段,燃烧前缘呈椭圆状推进,显示了较强的侧向扩展能力。点火启动阶段结束时,结焦带形状似“漏斗状”;燃烧前缘推进到水平井射孔段时,结焦带形状似切掉尖的圆锥体,结焦带与水平井产出方向的夹角约 60°。图 4b 和 4d 显示,油层顶面的结焦带厚度(约 5 cm)比下部大,这主要是模型上盖的传热所致。

### 2.2 利用模型本体 II 的实验

模型本体 II 的体积更大,而且注气井位置向模型内部移动了 100 mm,有利于揭示点火后燃烧前缘在注

气井四周的扩展情况，因此用模型本体 研究稳定泄油阶段及实验中后期燃烧前缘的展布特征。图 5 为利用模型本体 进行的实验点火后 0.5 h、4.0 h、6.0 h 和 8.5 h 的油层温度场图。在点火后 4 h 内燃烧前缘的扩展特征与模型 的实验结果相似。燃烧前缘的温度维

持在 450~550 °C，火线在油层上部的推进速度较快，整个实验过程中，火线都保持一定倾角向前推进，这种超覆式的燃烧有利于抑制氧气沿水平井突破。温度场图还显示，燃烧前缘越过水平井趾端后，仍能继续稳定向前推进，但随着火线的推进，燃烧带波及的范



图 4 三维火驱实验中途灭火后油层各区带照片

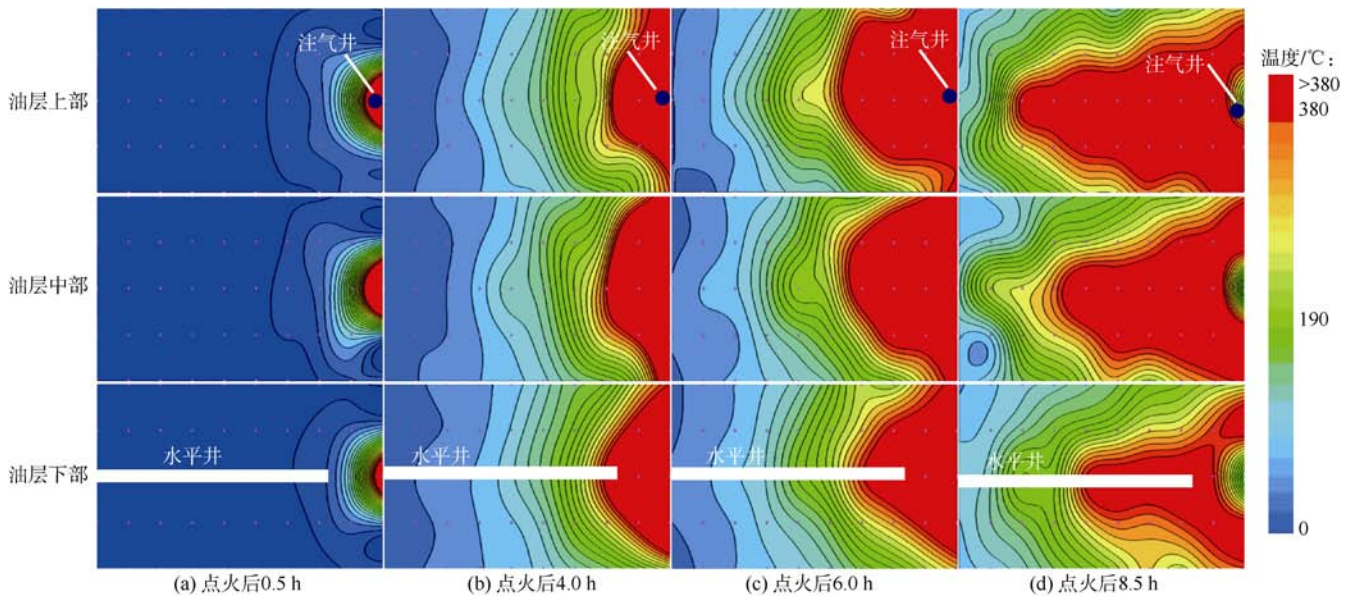


图 5 不同时间油层平面温度场展布

围逐渐减小,火线向水平井两侧方向扩展的能力远不如点火初期强,燃烧前缘在平面上沿水平井近似“楔形”超覆式向前推进。

实验在进行了6 h后尝试通过增大注气速率和提高注入空气温度来扩大火线的波及范围,温度场显示并没有取得预期的效果,只是超覆式燃烧的程度在注气速率加大后变得更明显。值得注意的是,随着火线的推进,燃烧前缘的温度呈下降的趋势,这主要是由于燃烧前缘宽度变窄后散热增加,而且后期提高注气速率使得水平井产出流体从燃烧前缘带走更多的热量;而燃烧前缘温度的降低可能又会进一步抑制火线在水平方向的扩展。从产出液看,稳定泄油过程一直在持续,泄油速度在8~10 mL/min变化。

为了研究燃烧前缘及结焦带在向前推进过程中的形状,实验进行9.0 h后注气井改注氮气灭火中止实验。实验中止时,阶段累计注气6.5 m<sup>3</sup>,累计产油4.6 L,折算出阶段采出程度为39%,阶段累计空气油比为1 400 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。如果不中止实验,预测最终采出程度在70%左右。

图6为利用模型本体进行的实验中止后,拆开模型上盖并清理掉已燃油砂的各区域带照片。图6a为油层俯视照片,其中凹陷区域展示了已燃区轮廓。图6b为向已燃区注入石膏并清理掉模型一侧未燃油砂后的照片,其中白色石膏展示了已燃区的立体形状。图6c为将石膏沿水平井切开后的已燃区剖面照片,结焦带沿红色实线展布,在垂向剖面上具有2个不同的倾角,这主要是点火6 h后增大注气强度所致,若注气强度保持恒定,结焦带在油层上部应沿着红色虚线展布,结焦带与水平井产出方向的夹角约45°。红色实线(结焦带)和蓝线所包围区域的油砂颜色比初始油砂颜色浅得多,含油饱和度明显减小,在清除已燃区周围油砂时结焦带外围都出现了一块类似的区域,即燃烧前缘之前的泄油带,图中的绿色箭头代表了泄油的路径。图6d为图6c中白圈区域的放大照片,结焦带将燃烧前缘之前的一段水平井完全包围,有效抑制了氧气从水平井筒的突破,这也是该阶段燃烧前缘稳定推进的一个重要原因。

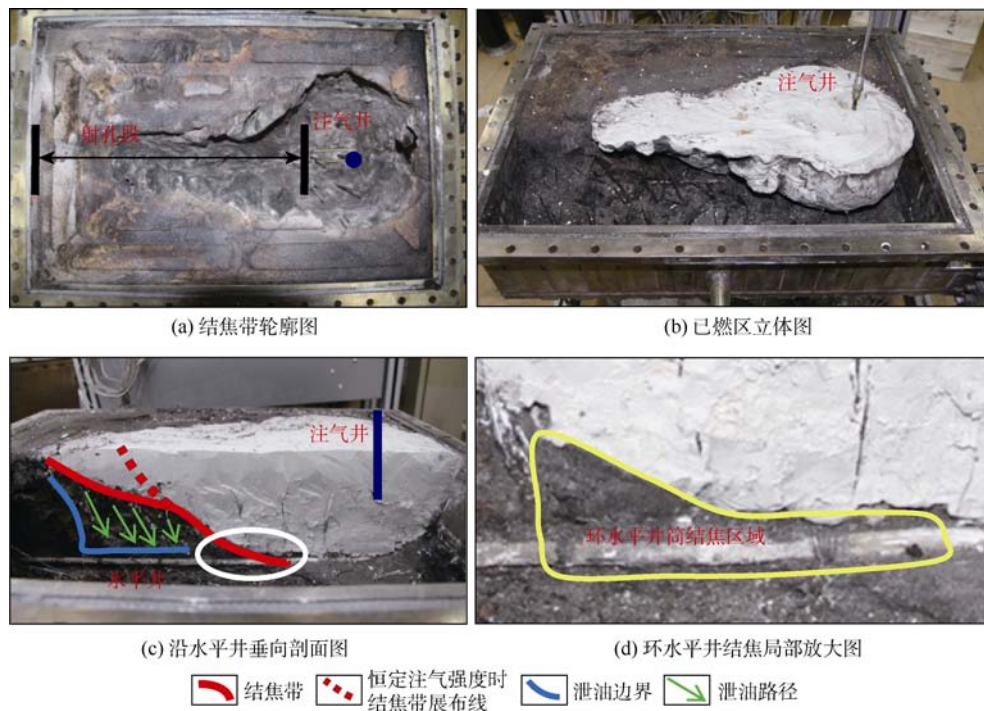


图6 三维火驱实验中途灭火后油层各区带照片

### 3 燃烧前缘扩展过程与关键节点控制

结合以上实验中温度场的展布特征和拆开模型后的岩心照片分析,将燃烧前缘的扩展分成3个阶段,即点火启动阶段、径向扩展阶段和向前推进阶段。图7为各阶段已燃区、燃烧前缘、结焦带和泄油带的剖面

和平面示意图。

#### 3.1 点火启动阶段

高的点火温度(500℃以上)是实现点火启动的必要条件,同时点火位置应选择油层的中上部。在点火启动阶段,燃烧区域相对较小,且有相当一部分热量随产出流体从水平井排出,热量聚集速度比常规火

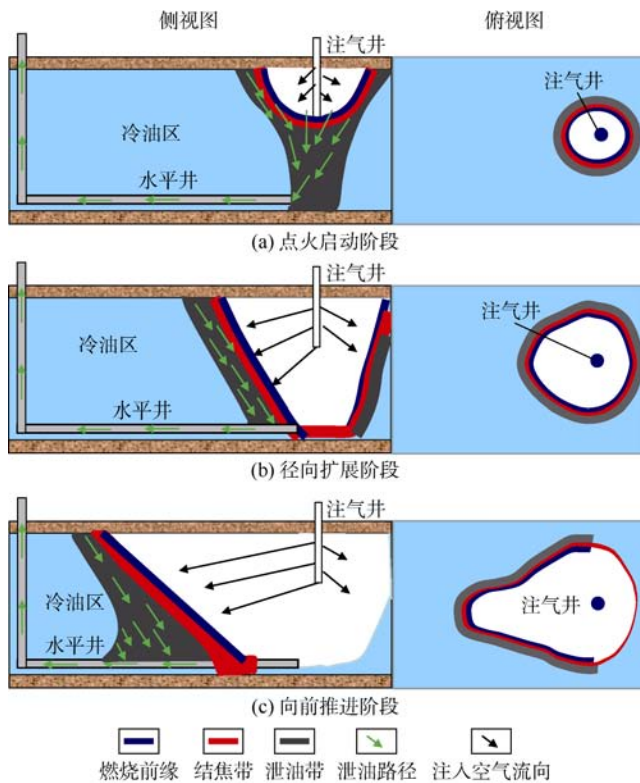


图7 不同阶段燃烧前缘展布示意图

驱慢，因而该阶段的控制十分重要。在笔者进行的一系列三维实验中，就出现过因对点火温度和注气量控制不当导致点火不充分甚至在点火启动阶段熄火的现象，点火不充分将导致燃烧前缘温度相对较低，这对燃烧前缘的扩展和泄油稳定会造成不利影响，而熄火后再次点燃油层的难度很大。

### 3.2 径向扩展阶段

点火启动成功后，燃烧区域继续向四周和下部扩展，高温燃烧前缘保证了高的氧化速率，使注入的氧气被完全消耗，燃烧后的高温气体直接流向水平井的趾端。在结焦带推进到水平生产井趾端之前，燃烧区域四周压力梯度大致相同，燃烧前缘在平面上径向扩展，扩展面呈椭圆形，沿水平井方向为长轴方向，由于气体的超覆作用，燃烧区域的半径从油层上部到下部逐渐减小，此阶段为燃烧前缘径向扩展阶段。在这一阶段，燃烧前缘稳定推进的关键在于使注气速率与燃烧区域耗氧量保持一致，注气量过低将影响燃烧前缘的扩展能力，注气量过高则有可能导致氧气从水平井趾端突破。

### 3.3 向前推进阶段

随着燃烧前缘的继续推进，原油开始在水平井趾端结焦，结焦带阻止了氧气直接进入水平井筒，并使燃烧后的气体穿过结焦带流向水平井封堵段之前的射

孔段随原油一起产出。很明显，此时沿水平井垂向剖面方向的压力梯度比沿水平井两侧方向的压力梯度大，燃烧前缘沿水平井方向的推进速度加快，而沿水平井两侧方向的扩展能力减小，导致燃烧前缘呈“楔形”向前推进。从室内实验看，这种“楔形”推进是“一（直井）注、一（水平井）采”井网模式下的必然结果。要改变这种状态，使燃烧前缘尽可能向水平井两侧扩展，需要完善井网模式，如在水平井两侧增加排气/生产井等。

## 4 氧气突破问题与矿场调控策略

### 4.1 氧气突破及其带来的油藏工程风险

氧气的突破是采用火烧油层技术进行油藏开发时必须要考虑的问题。对于常规直井火驱，气体的重力超覆作用、油层渗透率的非均质性以及次生水体等都可能导导致氧气从生产井过早突破，影响最终开采效果。对于水平井火驱辅助重力泄油技术来说，情况则不同，由于流体从油层底部的水平生产井产出，气体重力分异引起的超覆式燃烧恰恰抑制了氧气从水平井的突破。同时其特有的压力梯度系统对超覆式燃烧又形成了一种平衡机制，使超覆式燃烧始终在一个可控制的范围。从表面上看，氧气很容易从水平井突破，但燃烧过程中结焦带的封堵作用改变了压力梯度的分布特征，从而使空气渗流的路径发生变化，抑制了氧气的突破。Greaves M 等多次提到了水平井内外结焦带对空气的封堵作用<sup>[15-16]</sup>，并认为这种封堵机理是该技术固有的属性，但对其可能存在的风险和影响因素并没有研究。

笔者通过一系列三维室内实验发现，结焦带的封堵能力与实验过程的操作参数密切相关，尤其当燃烧前缘越过水平井趾端射孔段后，如果对注采参数控制失当，空气就会突破结焦带的封堵直接进入水平井筒引起高温燃烧，造成水平井产出液温度和产出气体中氧气含量急剧升高，严重时甚至会烧毁水平井筒。图8为采用模型本体II进行某次实验时油层下部不同时间的温度场图，展示了燃烧前缘沿水平井筒的突破过程。由于当火线推进到水平井趾端射孔段时注气速率过大，实验点火3.5 h后温度场显示燃烧前缘有沿水平井突进的迹象，点火4.5 h后由于水平井产液温度急剧升高，产出气体含氧量急剧增大，实验被迫中止。实验结束拆开模型本体后仍采用石膏浇注已燃区，图9即为石膏成形后沿水平井方向切开石膏和油砂后的垂直剖面照片，由于实验过程中氧气沿水平井突破，燃烧前缘并没有沿着红色虚线展布而是沿红色实线向下推进。为

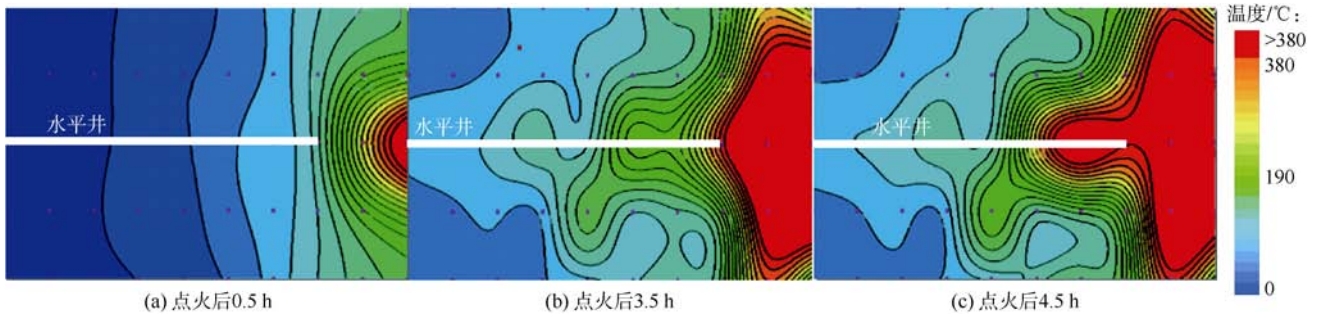


图 8 不同时间油层下部温度场展布

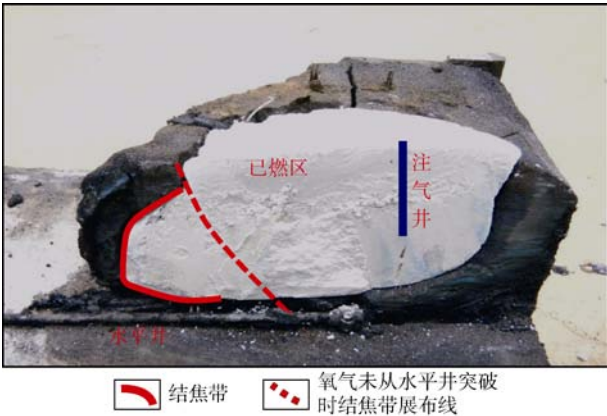


图 9 三维火驱实验中途灭火后油层各区带照片

了更直观地展示并分析燃烧前缘的突进特征，对已燃区(石膏)进行了测绘(见图 10)，测绘数据按三维比例扩大后可以为矿场油藏工程参数设计提供参考。同时，结合测绘图、温度场图和拆开模型的解剖图，展示了点火启动、径向扩展、向前推进和突破的演进过程(见图 11)，这对矿场生产操作控制也具有指导意义。

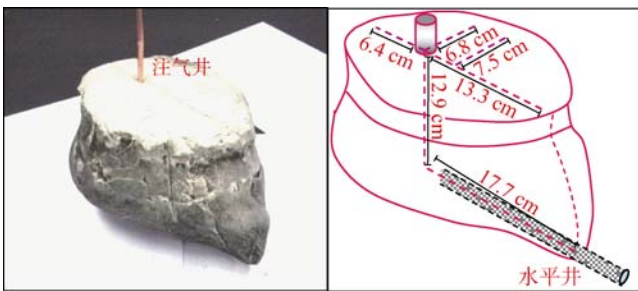


图 10 已燃区形状及其测绘图

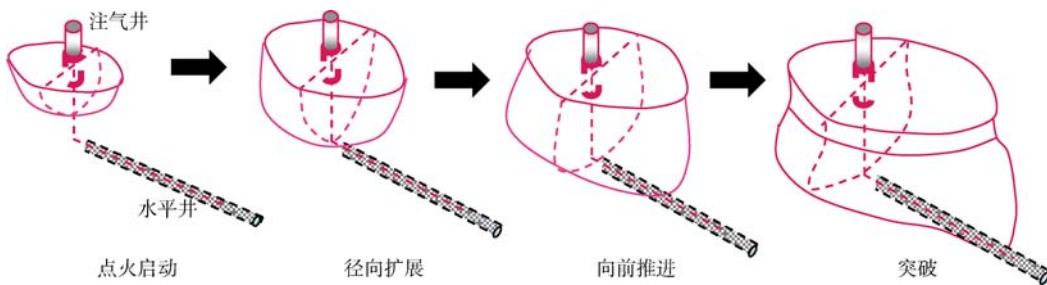


图 11 燃烧前缘沿水平井突破过程示意图

在实验过程中，利用温度场监测到燃烧前缘沿水平井筒的突破趋势后，笔者尝试采用降低注气速率并提高注气压力的方法来扭转这种趋势，虽然最终没有取得成功，但却有效地延缓了空气突破的进程。值得注意的是，在降低注气速率并提高注气压力后，氧气利用率明显提高，这表明对于该技术，在一定的油藏条件下，一定的注气压力对应着一个最大注气速率，超过该速率后就会发生氧气突破。寻求注气速率与注气压力的对应关系将是火驱辅助重力泄油技术下一步研究的一项重要内容。

#### 4.2 点火及稳定泄油初期矿场调控策略

从现有室内模拟实验看，燃烧前缘沿水平井的突进是火驱辅助重力泄油过程中最大的不利因素。在矿场实际条件下，当水平井射孔段暴露于高温注入空气之下时，一旦操控不当氧气随着高温可动油进入水平段，就会发生燃烧。从油藏上看，一旦形成热前缘突破，会大大降低平面波及系数，且很难调整和逆转；从工程上看，一旦操作制度不合理则很容易形成热前缘和氧气前缘的突破，可能烧毁水平井段并危及井口和地面。防止燃烧前缘沿水平井的突破是保证矿场顺利实施的关键因素。根据现有的室内三维物理模拟实验结果和操作经验，建议矿场试验在井网模式、点火参数和注采制度等几个方面采取措施。①该技术简单的井网模式使调控手段相对单一，当水平井因燃烧前缘突破或因砂埋等故障需要压井作业时，烟道气无法

及时排出,将使燃烧前缘面临熄火的危险。因此,矿场试验中应考虑增加烟道气的排气通道,在水平井两侧适当位置设置备用的排气直井,这既能增强燃烧前缘的可调控性又能降低因水平井作业引起的燃烧前缘熄火风险。②矿场试验在点火阶段要维持足够高的点火温度(500℃以上),在点火成功后最好能继续注入一段时间的高温空气,以在一定程度上弥补由于热量被采出液携带出来所导致的热损失,确保良好的点火效果。③点火初期注气提速采取小幅度多级次的原则,同时尽量提高注气压力,注气压力升高后等量气体(标准状况下)的体积缩小,在相同的空气消耗条件下,气体的渗流速度减小,从而使水平井两侧方向的压力梯度与沿水平井方向的压力梯度差异减小,这有利于燃烧前缘的稳定扩展,同时对后期燃烧前缘的楔形推进也有一定的抑制作用。④矿场试验中应控制生产井的产气速率,使之与注气速率相匹配,但是对产出气量的控制要比对注气量的控制难得多,矿场可以摸索通过产出气液比、产液温度、产出气体组分和注采压差等指标控制注采平衡的方法。

## 5 结论

通过对三维火驱物理模拟实验温度场和实验后模型砂体的剖析,可将水平井火驱辅助重力泄油过程中燃烧前缘的扩展分为3个阶段,即点火启动阶段、径向扩展阶段和向前推进阶段。点火启动阶段,油层上部最先实现点火,点火温度、点火时间和注气速率是该阶段的关键操作参数。径向扩展阶段,燃烧前缘呈“漏斗状”继续向四周和下部扩展,此时调控的关键在于注气速率与燃烧前缘的面积相匹配。燃烧前缘推进到水平井趾端射孔段后,以一定的倾角朝水平井跟部方向推进,超覆式燃烧和结焦带对水平井筒的封堵是该阶段实现稳定泄油的重要原因。但在“一注、一采”的井网模式下,随着燃烧带沿水平井筒方向推进距离的加大,其前缘的侧向扩展能力会逐渐下降,不利于进一步提高燃烧带平面波及系数。当燃烧前缘推进到水平井趾端时,注、采工作制度的控制至关重要。一旦控制失当,就可能出现燃烧前缘沿水平井突破的情况,矿场实践中应从井网模式、点火参数和注采制度等几个方面采取优化措施,最大限度降低其风险。

### 参考文献:

- [1] Greaves M, Al Shamali O. In situ combustion (ISC) process using horizontal wells[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1996, 35(4): 49-55.
- [2] Greaves M, Ren S R, Xia T X. New air injection technology for IOR

- operations in light and heavy oil reservoirs[R]. SPE 57295, 1999.
- [3] Greaves M, Xia T X, Ayasse C. Underground upgrading of heavy oil using THAI “Toe-to-Heel Air Injection”[R]. SPE 97728, 2005.
- [4] Xia T X, Greaves M, Turta A T. Injection well-producer well combinations in THAI “Toe-to-Heel Air Injection”[R]. SPE 75137, 2002.
- [5] 李伟超, 吴晓东, 刘平. 从端部到跟部注空气提高采收率的新方法[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(1): 78-80.
- Li Weichao, Wu Xiaodong, Liu Ping. Toe-to-Heel Air Injection new method of EOR[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(1): 78-80.
- [6] 韩国庆, 吴晓东, 李伟超, 等. THAI 技术及其在稠油开发中的应用[J]. *油气田地面工程*, 2007, 26(5): 17-18.
- Han Guoqing, Wu Xiaodong, Li Weichao, et al. THAI technology for IOR operations in heavy oil reservoirs[J]. *Oil-gasfield Surface Engineering*, 2007, 26(5): 17-18.
- [7] Rojas J, Ruiz J, Vargas J. Numerical simulation of an EOR process of Toe to Heel Air Injection (THAI): Finding the best well pattern[R]. SPE 129215, 2010.
- [8] Greaves M, Xia T X, Turta A T, et al. Recent laboratory results of THAI and its comparison with other IOR processes[R]. SPE 59334, 2000.
- [9] Xia T X, Greaves M. Upgrading Athabasca tar sand using Toe-to-Heel air injection[R]. SPE 65524, 2000.
- [10] Greaves M, Al Honi M. Three-dimensional studies of in-situ combustion: Horizontal wells process with reservoir heterogeneities [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2000, 39(10): 25-32.
- [11] Greaves M, Dong L L, Rigby S P. Validation of Toe-to-Heel air-injection bitumen recovery using 3D combustion-cell results[R]. SPE 143035, 2012.
- [12] 关文龙, 席长丰, 陈亚平, 等. 稠油油藏注蒸汽开发后期转火驱技术[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 452-462.
- Guan Wenlong, Xi Changfeng, Chen Yaping, et al. Fire-flooding technologies in post-steam-injected heavy oil reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 452-462.
- [13] 关文龙, 吴淑红, 梁金中, 等. 从室内实验看火驱辅助重力泄油技术风险[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 31(4): 67-72.
- Guan Wenlong, Wu Shuhong, Liang Jinzhong, et al. The research of engineering risk in combustion assisted gravity drainage by using 3D physical modeling[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(4): 67-72.
- [14] 关文龙, 马德胜, 梁金中, 等. 火驱储层区带特征实验研究[J]. *石油学报*, 2010, 31(1): 100-104, 109.
- Guan Wenlong, Ma Desheng, Liang Jinzhong, et al. Experimental research on thermodynamic characteristics of in-situ combustion zones in heavy oil reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(1): 100-104, 109.
- [15] Xia T X, Greaves M, Turta A T. Main mechanism for stability of THAI “Toe-to-Heel Air Injection”[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2005, 44(1): 42-48.
- [16] Greaves M, Xia T X, Turta A T. Stability of THAI™ process: Theoretical and experimental observations[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2008, 47(9): 65-73.

第一作者简介: 梁金中(1984-), 男, 山东嘉祥人, 中国石油勘探开发研究院在读博士研究生, 主要从事稠油热采基础理论研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院热力采油研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: 249810864@qq.com

收稿日期: 2012-03-27 修回日期: 2012-08-25

(编辑 胡媛 绘图 刘方方)