

文章编号:1000-5870(2003)02-0047-04

乐安油田注汽后火烧油层开发参数敏感性研究

杜殿发¹, 姚 军¹, 邱国清², 李迎春²

(1. 石油大学石油工程学院, 山东东营 257061; 2. 胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东东营 257015)

摘要:火烧油层开发效果的影响因素很多,但在油藏条件一定的情况下,可通过分析开发参数的敏感性并设计其合理值来提高火驱的经济效益。以乐安油田火烧试验区为例,在注蒸汽热采历史拟合及蒸汽驱预测的基础上,利用工程计算及数值模拟方法,研究了射孔层位、射开厚度、注气速度、燃烧方式、转湿烧时机、湿烧水气比等参数对火烧效果的影响,分析了火烧前缘推进速度,优选了开发参数。结果表明,底层射孔可减轻火线超覆,射开厚度大可提高地层吸气能力。由空气油比和采收率来确定分阶段变速率注气开采效果较好,最大注气速度为 80 000 m³/d。湿式燃烧能提高采收率,降低空气油比,其合理的转湿时机为燃烧距离达到 25%,水气比为 2.0 kg/m³。预测结果与实际结果吻合较好,为火驱试验的现场实施提供了理论依据。

关键词:稠油油藏;火烧油层;蒸汽吞吐;湿式燃烧;干式燃烧;开发参数;数值模拟

中图分类号:TE 357.41 **文献标识码:**A

引言

火烧油层是一种具有明显技术优势和潜力的热力采油方法,是提高稠油采收率的主要技术之一,室内试验和矿场试验证实火驱采收率可达到 50%~80%^[1]。但该技术提出初期由于对驱油机理认识不够,造成试验经常失败,故而一直未得到广泛应用。近年来随着对燃烧机理认识的提高,此技术重新被重视。我国稠油开采初期一般应用注蒸汽热采方法,因此,目前火烧油层常作为注蒸汽后的接替开发方式。笔者选择注蒸汽开采近 10 年的乐安油田南区为研究对象,结合工程计算和数值模拟方法,在蒸汽吞吐-蒸汽驱历史拟合的基础上,对火井的射孔位置、厚度、注气速度、燃烧方式、转湿时机、水气比等开发参数进行敏感性分析和优化,以提高稠油油藏的火驱开发效果。

1 注蒸汽热采的历史拟合和指标预测

乐安南区自 1991 年投入开发,注蒸汽开采已近 10 年,地下参数场已发生很大变化^[2,3],要研究火烧效果,首先须确定剩余油、温度及压力的分布,也即须进行注蒸汽热采阶段的历史拟合,以对地质、流体及热物性参数进行校正,形成火烧油层的初始场。

1.1 历史拟合

以 45-x17 井为中心,包括二线油井,共有 26 口。模拟面积 0.837 km²,油藏埋深 780~960 m,纵向上分 3 个岩性层,自上而下分别为砂岩、砂质充填砾岩、砂泥质充填砾岩,其基本参数见表 1。考虑该区西北部边水体积约是油体积的 5~8 倍,在模拟网格的西北边界各加一口水平注水井来模拟边水入侵。

表 1 岩石物性参数

岩性	孔隙度 / %	渗透率 $k/10^{-3}\mu\text{m}^2$	含油饱和度 $S_o/\%$
砂岩	33	5000	60
砂质充填砾岩	14	4000	60
砂泥质充填砾岩	10	600	50

原油密度为 0.97~0.99 g/cm³;50 地面脱气原油粘度为 20~80 Pa·s;相同温度下,地下原油粘度约为地面脱气油粘度的 65%。

主要拟合指标包括区块及单井的累积产油量、日产油量和累积产水量(表 2),地层压力作为参考值用来判断区块的注采平衡情况。井组的累积产油量和累积产水量拟合误差在 5%以内,单井累积产油量和累积产水量拟合误差在 10%以内,拟合率为 82%。

截止到 2000 年 6 月,该井组的采出程度已达

收稿日期:2002-04-16

基金项目:中国石油化工集团公司资助项目(YTDN99-3)

作者简介:杜殿发(1972-),男(汉族),河北沧县人,讲师,在读博士研究生,主要从事油气田开发工程的教学及研究工作。

36.4%,井间热连通已基本形成,吞吐井加热半径可达70~100 m。从温度场分布来看,油层基本全部受效,累积亏空 50.52×10^4 t。该井组地层压力降至3~4 MPa,下降幅度已达50%左右,因此继续吞吐已不能维持地层能量,应及时转为其他开采方式。

表2 蒸汽吞吐阶段历史拟合指标对比

比较量	储量 / 10^4 t	累积产油量 / 10^4 t	累积产水量 / 10^4 m ³	累积注气量 / 10^4 m ³
实际值	93.8	35.89	78.15	68.26
计算值	98.6	35.33	81.98	68.26
相对误差 / %	5.1	1.6	4.9	0

1.2 蒸汽驱效果预测

为与火驱效果对比,将45-x17井改为注汽井,汽驱6 a,累积产油 49.0351×10^4 t,汽驱阶段产油 13.1451×10^4 t,阶段采出程度13.3%,累积注汽 58.54×10^4 t,油气比0.22。汽驱末地层压力已降至1.5 MPa左右,地层能量已经很低,已不能继续注汽开采。

2 火驱开发参数计算及优选

火烧油层采油机理复杂,影响因素多,因此计算火烧参数非常重要。火驱方案参数的获得主要通过室内试验^[4,5]、工程计算^[6,7]、数值模拟^[8,9]等方法。笔者借鉴室内试验结果,综合工程计算及数值模拟方法对45-x17井组的火驱参数进行了概算和优选。

2.1 火驱模型

在蒸汽吞吐模型的基础上建立火驱模型,考虑4相——气相、水相、油相和固相;7个组分——水、原油的重组分、甲烷、二氧化碳、一氧化碳和氮气、氧气、焦炭;4个化学反应——重组分受热裂解成轻组分(甲烷)和焦炭、轻组分燃烧、重组分燃烧、焦炭燃烧。岩石及流体的热物性参数如下:顶、底导热系数为 $149.6 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$,岩石热容量为 $2350 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$,岩石导热系数为 $600 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$,水相导热系数为 $53.5 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$,油相导热系数为 $12 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$,气相导热系数为 $3.2 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

火驱初始场包括含油饱和度、含水饱和度、压力和温度分布(均取注蒸汽末拟合的场参数分布),采用反九点井网,井距为 $200 \text{ m} \times 283 \text{ m}$,将中心井45-x17转为火驱井,注入空气,而其他井为生产井。

2.2 射孔层位及厚度

同其他开采方式一样,火烧油层也要求在钻开油层、固井、修井等作业过程中防止油层污染,以确保油层畅通,这是火驱过程中火线均匀推进的先决条件。为便于火烧油层的调节与控制,注入井和生

产井一般都采用射孔完井^[1]。为研究射孔完井对火驱效果的影响,选择不同注气井的射孔层位及厚度分别计算其开发效果,燃烧方式为干烧,注气速度为 $30000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。计算结果如表3所示。

表3 不同射孔层位及厚度的火驱效果

射孔层位	厚度 /m	累积产油量 / 10^4 t	采收率 / %	注气量 / 10^4 m ³	空气油比 / $(\text{m}^3 \text{ t}^{-1})$
第1层	1.5	8.52	36.8	9277	1089
第1-2层	12.3	9.37	40.5	12510	1335
第1-3层	17.6	9.70	41.9	12510	1290
第2层	10.8	8.56	37.0	9325	973
第2-3层	16.1	9.42	40.7	12510	1328
第3层	5.3	8.34	36.0	9215	1105

注:表中生产数据为一线井统计结果,以下各表同。

由表3可以看出,随射孔段长度的增加,累积产油量增加,两者基本上是正比例关系。原因在于射孔段越长,地层垂向上吸气越均匀,垂向波及系数越大,累积产油量也就越高。考虑砂砾岩为该区主力层,并尽可能减轻火线的超覆现象,提高火烧油层的热利用率,选择射开第2-3层。表3中射开不同层位累积注气量不同,主要原因是地层的非均质以及厚度、渗透率的不均匀造成地层吸气能力不同。

2.3 注气速度

注气速度直接影响燃烧前缘推进速率,同时也是地层内能否维持燃烧的重要因素。注气速度偏低则不足以维持油层稳定的燃烧,甚至出现灭火;注气速度偏高则氧气利用率偏低,经济效益变差。因此,空气注入速度的选择对火烧油层的开发效果至关重要。

根据乐安南区45-x17井组的实际情况,选择了恒速率和变速率两种注入方式。恒速率(i_a)选择 $10000, 20000, 30000, 40000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。变速率采用奈尔逊(Nelson)和马克尼尔(McNiel)提出的三段式注入^[10]:初始阶段注空气量随时间线性增大到最大值;然后以最大的空气注入速率($i_{a\text{max}}$)恒定不变,维持燃烧过程的大部分时间;最后是注入空气速率由最大值线性减小到零,如图1所示。

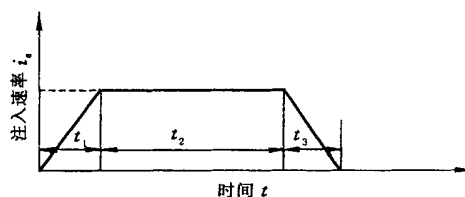


图1 变速注入示意图

变速率注入的计算^[11]根据胜利油田燃烧釜试验结果,燃料含量 m_R 为 $35.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$,空气消耗量

为

$$V_R = \frac{112.5 m_R}{12 + X} (1 - 0.5 m + 0.25 X).$$

式中, V_R 为燃尽单位体积油层的空气消耗量, m^3/m^3 ; X 为视碳氢原子比; m 为燃料产物中 CO 与 $(\text{CO} + \text{CO}_2)$ 的摩尔比。

计算出的空气消耗量为 $320 \sim 370 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 考虑到乐安南区油层的易窜性, 取氧气利用率为 85% , 则空气消耗量约为 $350 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

对于 45-x17 井组, 若火烧前缘推进均匀且没有发生单方向气窜, 取空气面积波及系数 E_a 为 55% , 垂向波及系数 E_v 为 85% , 则单井组火驱开发所需空气总量为

$$V_{Ta} = E_a E_v h F V_R.$$

式中, V_{Ta} 为注入空气总量, m^3 ; F 为井组面积, m^2 ; h 为油层厚度, m 。

经计算, 该井组所需空气总量为 $2.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

按奈尔逊 (Nelson) 和马克尼尔 (McNiel) 的方案, 计算最大空气注入速度 i_{amax} 为 $12.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 即 $86 \text{ m}^3/\text{min}$; 第一阶段所需时间 t_1 为 251 d, 在第一阶段共注入空气量 V_{1a} 为 $1.8 \times 10^7 \text{ m}^3$; 假定最后阶段和初始阶段时间相同、注入量相同, 即 $t_3 = t_1$, $V_{3a} = V_{1a}$, 则第二阶段的时间 t_2 和空气注入量 V_{2a} 分别为 1532 d 和 $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

由不同注气速度下的开发指标 (表 4) 可以看出, 恒速注入时, 以 $30000 \text{ m}^3/\text{d}$ 速度注入累积产油量最高。原因是注气速度小时, 燃烧缓慢, 火线温度低, 有可能造成油层局部熄火 ($8000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的速度注气, 该井组则不能维持燃烧); 注气速度大, 燃烧速度就大, 完成方案的时间就短, 但注气速度过大, 又容易发生气体外溢, 造成空气消耗量增大, 体积扫油系数降低, 火驱成本升高。

表 4 不同注气速度下的开发指标对比

注气速度 / $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	阶段累积产 油量/ 10^4 t	采收率 / $\%$	注气量 / 10^4 m^3	空气油比 / $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$
10000	8.36	36.1	4200	502
20000	8.76	37.8	8400	959
30000	9.7	41.9	12510	1290
40000	8.96	38.7	16430	1834
分阶段变速	9.8	42.3	21180	2161

分阶段变速注入方案比较符合火烧驱油规律, 累积产油量也最高, 但模拟计算的累积注气量和最大注气速度 ($80000 \text{ m}^3/\text{d}$) 都没有达到工程计算的指标。这是因为工程计算方法认为油藏是均质的, 而数值模拟则考虑了非均质, 故计算生产指标略低。

2.4 转湿时机

火烧油层可分为干式燃烧和湿式燃烧。干式燃烧是一种最早采用、最简单、也是目前最常使用的燃烧方法, 但从干式燃烧的基本过程来分析, 尚存在热利用率较低的缺点。由于燃烧产生的热量大约仅有 20% 被带到燃烧前缘前进方向的前面, 且只有这小部分热量对采油有利, 而大部分热量则留在已燃区内和损失在油层的上下夹层内, 对采油毫无作用。为了克服干式燃烧的上述缺点, 人们对其进行了重要改进, 形成湿式燃烧法。湿式燃烧又称为联合热驱或燃烧与注水联合, 它是在干式燃烧一定距离后, 待油层内积蓄一定热量时, 将适量的水与空气从注入井同时或交替注入, 而油层仍维持燃烧, 这样可以提高在火烧油层过程中注气井和燃烧前缘之间的热利用率。

根据湿式燃烧的特点, 需要确定干烧转湿烧的时机。如果注水过早, 则由于燃烧的范围小, 油层内积蓄热量少, 使火线 (燃烧前缘) 降温过多, 易造成灭火的后果; 如果掺水过晚, 就不能充分发挥湿式燃烧优越性。为研究不同转湿时机对开发效果的影响, 分别对干式燃烧不同时间后转湿式燃烧、水气比为 1.2、间歇注入方式下的开发指标进行了计算, 结果见表 5。

表 5 不同转湿时机开发指标对比

转湿时间 / d	累积产 油量/ 10^4 t	燃烧距离 百分数/ $\%$	采收率 / $\%$	空气油比 / $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$
365	11.0	8.39	47.5	1611
547	11.0	12.57	47.5	1586
733	11.1	16.85	48.0	1561
912	11.3	20.96	48.8	1506
1095	11.5	25.20	49.7	1456
1400	11.4	32.81	49.2	1489

表中的燃烧距离百分数为燃烧距离达到注采井距的百分数。分析温度场分布可计算出燃烧前缘的平均向前推进速度为 $0.046 \text{ m}/\text{d}$, 用井距为 200 m 计算燃烧距离百分数。

由表 5 看出, 随着转湿时间的延长, 采出程度增加, 空气油比降低; 但燃烧距离百分数超过 25% 时, 采收率有所降低。因此, 应选择燃烧距离百分数为 25% 时转湿烧, 该结果和胜利油田的湿烧室内试验结果^[5]比较吻合。

2.5 水气比

在湿式燃烧过程中, 水气比的选择比湿式燃烧时机的选择更加重要。因为水气比过高时, 火线将会降温过多, 从而造成灭火的后果; 而水气比过低,

又不能充分、有效地改善火烧油层的经济指标。为确定合适的水气比,选择了7种方案进行计算,结果见表6。

表6 不同水气比开发指标对比

水气比 / (kg·m ⁻³)	累积产 油量/10 ⁴ t	采收率 / %	累积注气 量/10 ⁴ m ³	空气油比 / (m ³ ·t ⁻¹)
0.0	9.8	42.3	21180	2161
0.4	9.92	42.8	17358	1750
0.6	10.2	44.0	17350	1701
1.0	10.8	46.6	17336	1605
1.2	11.1	47.9	17285	1557
1.5	11.4	49.2	17150	1504
2.0	11.8	50.9	16580	1405
3.0	11.0	47.5	15645	1422

表中水气比为0表示干式燃烧,因而该结果也反映了燃烧方式对开发效果的影响。表6充分说明,湿式燃烧比干式燃烧有效,既提高了采收率,又降低了空气油比,从而提高了经济效益。由表6还可看出,在水气比小于2.0 kg/m³时,随着水气比增加,油藏中能形成的蒸汽带增加,这些蒸汽带对驱油起到了非常重要的作用,导致采收率增加,空气油比线性减小;当水气比大于2.0 kg/m³时,油藏中产生的热量有限,火线降温过多,蒸汽带的作用降低,采收率随之降低。

3 现场实施参数

乐安油田南区火烧试验井组于2001年3月投产,为减轻火线超覆,射开底层注气,采用变速率的注气方式,注气速度逐渐增大。截止到2001年12月,注气速度依次为5760,21600,43200,72000 m³/d,合计用时约270 d,累积产油5500 t(含二线井),目前仍进行干式燃烧驱油。可见实际生产与模拟计算结果比较符合。

4 结论与认识

(1)通过注蒸汽热采的历史拟合,认为45-x17井组已基本得到动用,地层亏空较大,压力已降至3~4 MPa,但仍有63.6%的原油储藏在地下,须采取新的工艺措施进一步提高采收率。蒸汽驱预测结果表明,汽驱阶段采出程度(全井组)为13.3%,效果不理想。

(2)建立了吞吐后火驱的数值模型,研究了不同射孔层位和厚度对火驱开发效果的影响。火井射开第2-3层,既可保证地层的吸气能力,又能减缓火线超覆,充分利用热能,开发效果较好。

(3)随注气速度增加,采收率和空气油比均增大。采用分阶段变速注气比较符合燃烧规律,开采效果较好,但由于地层非均质的影响,数值模拟计算指标低于工程计算结果。

(4)湿式燃烧开发效果好于干式燃烧,但需要选择合理的转湿时机和水气比。对45-x17井组而言,燃烧距离达到注采井距的25%时,转湿效果较好;该井组湿烧时水气比选择2.0 kg/m³、火线平均推进速度为0.046 m/d比较合理。

参考文献:

- [1] 张敬华,等. 火烧油层采油[M]. 北京:石油工业出版社,2000.11.42.
- [2] 姜汉桥,等. 剩余油分布规律的精细数值模拟[J]. 石油大学学报(自然科学版),1999,23(5):31-34.
- [3] 杜殿发,等. 边水稠油油藏水驱后蒸汽吞吐方案设计[J]. 石油大学学报(自然科学版),2000,24(2):44-46.
- [4] 李少池,等. 火烧油层物理模拟的研究[J]. 石油勘探与开发,1997,24(2):73-79.
- [5] 张毅,等. 火烧油层湿式燃烧的室内研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),2000,15(5):34-36.
- [6] 张毅,等. 预测火烧油层开发参数的工程算法[J]. 油气地质与采收率,2001,8(1):48-50.
- [7] 刘安源,等. 含油多孔介质热气流点火临界着火温度的理论研究[J]. 石油大学学报(自然科学版),2000,24(2):76-78.
- [8] 王艳辉,等. 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.
- [9] 胡士清,等. 火烧油层技术在庙5块低渗透稠油油藏中的应用[J]. 特种油气藏,1998,5(4):33-37.
- [10] NELSON T W, MCNEIL J S. How to engineer an in situ combustion project [J]. O G J, June 5,1961:58-65.
- [11] 王弥康,等. 火烧油层热力采油[M]. 东营:石油大学出版社,1998.57-72.

(责任编辑 陈淑娴)

worn away from PDC cutters to frictional works consumed during cutting rock was used as the rock abrasiveness index. The ratio values were in range $10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{kN} \cdot \text{m})$ to $10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{kN} \cdot \text{m})$. The drilled formations were divided into four classes, according to the abrasiveness indexes of formations. A mathematical model for predicting working life of PDC cutters based on the rock abrasiveness was derived. The laboratory and field test results demonstrated that the working life of PDC cutters in drilling the formation with abrasiveness index less than $5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{kN} \cdot \text{m})$ is about 350 hours, and it is less than 10 hours when the abrasiveness index of formation is over $5 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{kN} \cdot \text{m})$.

Key words: PDC bit; rock; abrasiveness; test; cutter; working life

MECHANIC MODEL FOR CROOKED ROD OF SURFACE-DRIVING PROGRESSIVE CAVITY PUMP/ SHI Guo'chen, CHEN Zhuo'ru, WU Xiaodong, et al. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001/ Shiyou Daxue Xuebao, 2003, 27(2):44~46

When surface-driving progressive cavity pump is used for oil production, there are a lot of factors causing rod to be crooked such as winding well-bore or material anisotropy of rod. Then the force acting on the rod may be changed. In order to avoid the loss caused by uncertainty of acting force on rod, the force states of crooked rod were analyzed with the differential method and iteration method. The results show that crooked rod stands the shearing force, bending stress, friction force and torque of friction for rod bending, except the torque and axial force on rod. The method for calculating torque and axial force may be changed with the extra forces on the crooked rod. A mechanic model for the crooked rod of the surface-driving progressive cavity pump was established on the above results. The calculation result of this model was compared with the measured data. It is proved that the model is suitable and accurate on site.

Key words: progressive cavity pump; rod; torque; drag; bending; mechanic model

EFFECT OF DEVELOPMENT PARAMETERS ON IN-SITU COMBUSTION AFTER INJECTING STEAM IN LE 'AN OIL FIELD/ DU Dianfa, YAO Jun, QIU Guoqing, et al. College of Petroleum Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2003, 27(2):47~50

The influence factors for combustion drive development are very complex. But the economic benefits of oil development can be improved by means of analyzing the sensitivity of operational parameters and optimizing the parameters under a certain reservoir condition. Taking an experimental reservoir of Le'an oil field as an example, on the bases of steam soak history matching and steam flooding forecasting, the main parameters influencing on combustion development, including perforation, air injection rate, combustion type (dry or wet), water-air ratio and the start time of water injection for wet combustion were investigated and optimized using engineering calculation method and numerical simulation. The frontal advancing rate was analyzed. According to the air to oil-production ratio and oil recovery, it is concluded that the perforation on bottom bed can reduce the overlap of combustion front, and the big thickness of perforation can increase the capability of inspiration, and the variable air rate is better than constant injection rate. The wet combustion is superior to dry combustion in improving recovery and making the air to oil-production ratio reduced. The optimized parameters include maximum air rate of $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ per day, water injection distance at combustion front equal to 25 percent of well space, and water-air ratio of 2 kg/m^3 . The calculation results agree with the practical results and can provide a theoretical basis for actualizing lease experiment and enlarging test area.

Key words: heavy oil reservoir; in-situ combustion; steam soak; wet in-situ combustion; dry in-situ combustion; development parameter; numerical simulation

LABORATORY EXPERIMENT ON IN-SITU COMBUSTION/ YANG De'wei, WANG Shi-hu, WANG Mi-kang, et al. College of Transport & Storage and Civil Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying 257061/ Shiyou Daxue Xuebao, 2003, 27(2):51~54

Some experiments on in-situ combustion process and wet combustion advancing process in thermal recovery were conducted in laboratory. Burning performance parameters, advancing velocity of burning front and oil recovery were determined under the above two conditions. The burning performance parameters include fuel consumption, apparent atom ratio of hydrogen to carbon and air consumption. The indexes of air-oil ratio and oxygen