

引用格式:王伟伟.不同含油饱和度对火驱效果影响实验研究[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):465-468.

WANG Weiwei.Influence of different oil saturation on fire flooding[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 465-468.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.024

不同含油饱和度对火驱效果影响实验研究

王伟伟

(中国石油辽河油田分公司,辽宁 盘锦 124010)

摘要:针对不同含油饱和度对火驱驱替过程及效果影响不明确的问题,利用火驱一维物模装置,探索了不同含油饱和度状态下的火驱可行性,开展了不同含油饱和度对火驱过程注气调整及生产效果影响的实验研究。实验结果表明,含油饱和度在15%以上均能实现高温燃烧,但含油饱和度在15%时原油全部转化为燃烧所需的燃料。火驱过程中含油饱和度越大,形成的油墙越大,造成的运移阻力越大,需要不断提高注气速度增加驱动力,造成模型压力随注气速度升高而增大。随着含油饱和度增加,驱油效率不断升高,空气油比则不断降低,表明生产效果越好。

关键词:含油饱和度;火驱;注气速度;压力;驱油效率

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Influence of different oil saturation on fire flooding

WANG Weiwei

(PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: In view of the unclear influence of different oil saturation on the process and effect of fire flooding, the feasibility of fire flooding under different oil saturation was explored by using one-dimensional physical model device of fire flooding, and the experimental study on the influence of different oil saturation on gas injection adjustment and production effect of fire flooding was carried out. The experimental results show that the high temperature combustion can be realized when the oil saturation is above 15%, but at this time, all the crude oil is converted into fuel for combustion. In the process of fire flooding, the greater the oil saturation is, the greater the oil wall is, and the greater the migration resistance is. It is necessary to continuously improve the gas injection speed to increase the driving force, resulting in the increase of model pressure with the increase of gas injection speed. With the increase of oil saturation, the displacement efficiency increases and the gas oil ratio decreases, indicating that the better the production effect is.

Key words: oil saturation, fire flooding, gas injection rate, pressure, displacement efficiency

辽河油田稠油资源丰富且复杂多样^[1],目前主力稠油区块历经三十年的开发已经进入注蒸汽热采开发的中后期阶段,油藏开发面临蒸汽吞吐轮次高、地层压力低、蒸汽驱汽油比低、剩余油分散、水侵等难题,亟须进行开发方式转换。火驱作为一种能有效提高采收率的稠油热采方法^[2-4],具有油藏适应范围广、物源充足、成本低等特点,已经得到广泛关注及矿场应用,辽河油田J91块也在开展转火驱开发矿场试验。含油饱和度作为油藏开发的重要参数,是评

价油藏开发价值和划分有利区的重要依据。在实际油藏开发过程中,随着开采程度不断加深,地层内含油饱和度不断发生变化,对开发效果产生不同影响。目前资料显示,含油饱和度的研究方向主要建立在水驱、蒸汽吞吐、蒸汽驱等驱替方式的基础上进行^[5-9],火驱中含油饱和度研究主要集中在火驱实验后不同区带的含油饱和度分布上^[10-12],缺少含油饱和度对火驱过程及效果的规律性分析。针对以上问题,以室内一维火驱实验为基础,探索不同含油饱和

收稿日期:2019-04-29。

作者简介:王伟伟(1982—),女,本科,高级工程师,主要从事油田稠油开发实验研究工作。地址:辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街86号,邮政编码:124010。E-mail:422411203@qq.com

基金项目:国家科技重大专项“辽河、新疆稠油(超稠油)开发技术示范工程”(2016ZX05055)。

度的火驱可行性,在稳定燃烧的前提下,分析不同含油饱和度对火驱过程中注气速度和压力的影响,对比不同含油饱和度的火驱生产效果,对火驱区块的优化选择及火驱生产效果的预测具有重要的现实意义。

1 火驱物理模拟实验设计

1.1 实验条件

实验采用火驱一维物理模拟装置模型,模型尺寸设计为42 cm×9 cm×3.6 cm,模型本体为填砂模型,共布设3行13列39支热电偶监测温度变化;模型中央处布设1支测压点监测模型内压力变化;点火方式为电点火,设计点火温度为500 ℃,点火器位于模型注气井位置。实验所用原油为J91块脱水原油,地面脱气原油黏度(50 ℃)为28 990 mPa·s,与石英砂按不同比例分别配比出15%、20%、30%、60%的含油饱和度。实验设计注气速度为8 L/min,模型出口回压设计为1 MPa。

1.2 实验过程

①将配制的油砂填入模型内,确保装填均匀后封盖;②确保测试模型密闭性;③连接并检查流程,保障各个系统运转正常;④启动点火器并向模型内注气,开展火驱一维实验;⑤火线到达生产井时灭火结束实验;⑥通风降低模型温度,直至室温。

2 实验结果及分析

2.1 火驱稳定性分析

点火成功后,火驱过程能否保持稳定的高温燃烧需要从温度和高温氧化判识指标两个方面进行分析^[13-20]。图1为不同含油饱和度下中轴测温点监测到的最高温度,表1为不同含油饱和度火驱实验产出尾气组分含量及判识指标。

从图1可以看出,由于点火器温度设定为500 ℃,不同含油饱和度实验点火初期注气井处温度均能达到500 ℃,点火成功。随着不断注气,模型内形成稳定的火线后关闭点火器。伴随注气速度的不断调整,不同含油饱和度下模型内最高温度均能维持在500 ℃以上,且能够保持火线稳定推进。随着含油饱和度和度增大,模型内最高温度也呈小幅上升趋势,分析

认为含油饱和度越大需要的注气速度越快,从而导致火线温度也越高。

目前火驱尾气判识指标认为,产出尾气中CO₂含量大于12%、视HC比范围为1~3、氧气利用率大于85%、氧气转化率大于50%即判定为高温氧化。分析不同含油饱和度尾气组分(表1)可以看出,不同含油饱和度CO₂、视HC比、O₂利用率及O₂转化率等指标均符合高温氧化指标范围,属于高温燃烧。因此,从温度和尾气指标可以判断,含油饱和度在15%及以上均能实现稳定燃烧。

2.2 对注气速度与压力的影响

火驱室内实验中,为了保证点火成功并保持火线稳定推进,需要不断调整空气的注入速度来实现。实验初期采用低注气速度,随着火线推进,相应调整注气速度,不同含油饱和度对应的注气速度也有所不同(图2)。

分析注气速度变化图可知,实验初期,均以低速8 L/min的注气速度注气,能够维持高温燃烧,随着火线推进,不同含油饱和度所需的注气速度开始出现差异。除了含油饱和度15%以8 L/min的注气速度烧完了全程,含油饱和度大于15%均需要调整注气速度,火线形成后注气速度不变导致火线推进速度

表1 不同含油饱和度火驱尾气组分及判识指标
Table 1 Composition and identification index of exhaust gas in fire flooding with different oil saturation

含油饱和度 (%)	尾气组分含量 (%)				评价指标		
	O ₂	CO	CO ₂	N ₂	视HC比	O ₂ 利用率 (%)	O ₂ 转化率 (%)
15	2.03	1.24	13.19	81.02	1.75	90.57	70.80
20	1.86	1.15	14.13	82.25	1.41	91.50	73.50
30	1.57	1.01	13.54	82.68	1.82	92.88	68.81
60	1.59	0.64	14.36	82.52	1.56	92.75	72.13

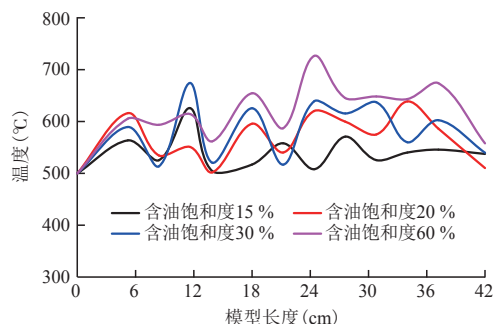


图1 不同含油饱和度对燃烧温度的影响曲线
Fig. 1 Effect curves of different oil saturation on combustion temperature

变慢、火线温度降低,注气速度调整后火线继续稳定推进。随着含油饱和度增大,低速注气时间越来越短,需要的注气速度越来越快,注气速度调整也更加频繁。随着注气速度的调整,模型内压力也随之发生变化(图3)。

分析压力变化可知,压力会随着注气速度增加而增大。含油饱和度15%注气速度不变模型内压力也保持平稳,其他含油饱和度条件下调整注气速度后模型内压力都开始增大,含油饱和度越大,模型内起压越早,压力变化越大,压力也越来越高。压力越大,原油运移的阻力就越大,就需要更高的注气速度来推动原油移动。因此,根据分析结果,注气速度主要有两个作用,维持火线燃烧所需的空气耗量以及提供原油向前运移的驱动力。火驱过程中维持高温氧化所需要的空气耗量与原油性质相关,对于同一种原油,改变含油饱和度对高温燃烧所需的空气耗量影响不大,随含油饱和度增加而加快的注气速度则主要用于作为推动原油运移的驱动力,而原油运移的阻力主要来自火驱过程中产生的油墙,也就是说,在稳定燃烧的前提下,含油饱和度越高,形成的油墙越大,造成的运移阻力也越大,需要的注气速度就越快。

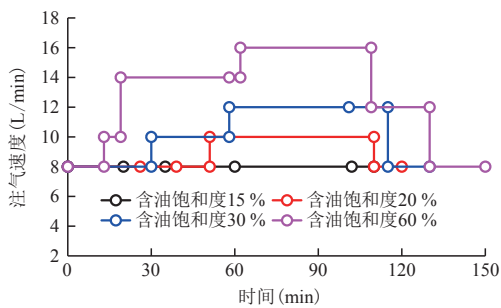


图2 不同含油饱和度在不同时刻注气速度调整曲线
Fig. 2 Gas injection velocity adjustment curves with different oil saturation at different time

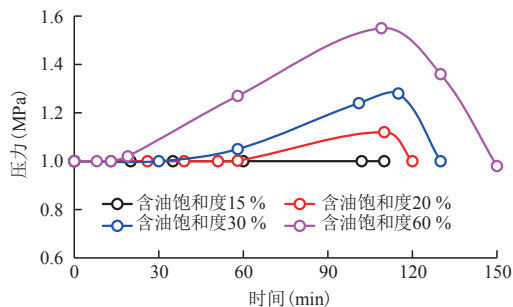


图3 不同含油饱和度在不同时刻模型内压力变化曲线
Fig. 3 Pressure curves of different oil saturation in different time models

2.3 对驱油效率和空气油比的影响

驱油效率和空气油比是反应火驱效果的两个重要指标。驱油效率越大,空气油比越低,说明火驱效果越好。表2为不同含油饱和度火驱实验后的驱油效率与空气油比。

从表2可以看出,含油饱和度对驱油效率、空气油比等经济性指标影响较大。含油饱和度15%火驱实验驱油效率小于2%,空气油比接近无限大,产出液中仅漂浮有零星油花;而含油饱和度大于15%实验产出液中均有油产出,驱油效率随着含油饱和度增加而升高,空气油比则随着含油饱和度增加而降低。结合不同含油饱和度火驱过程中注气速度和模型内压力的变化,分析认为含油饱和度15%火驱实验中没有形成油墙,所有的原油都转换成了高温燃烧所需的燃料,没有多余的原油被驱替出来,在技术上能实现火驱,但没有经济意义。对于同一种原油而言,维持高温燃烧所消耗的燃料几乎不变,没有参与燃烧的原油则以油墙的形式被驱替出来。含油饱和度越大,被驱替出的原油越多,驱油效率就越高,空气油比也越低。

3 结论

- 1) 含油饱和度在15%及以上时,火线温度能保持在500℃以上,尾气指标符合高温氧化,均能实现稳定燃烧并保持火线稳定推进。
- 2) 含油饱和度对火驱过程中的注气速度和压力有较大影响。随着含油饱和度增加,所需注气速度越来越高、模型压力越来越大,主要原因是火驱过程中产生的油墙随含油饱和度增加而增大造成运移阻力变大。
- 3) 含油饱和度对驱油效率和空气油比等经济性指标有较大影响。驱油效率随着含油饱和度增加

表2 不同含油饱和度的驱油效率和空气油比
Table 2 Oil displacement efficiency and air-oil ratio with different oil saturation

含油饱和度(%)	驱油效率(%)	空气油比(m ³ /t)
15	< 2	
20	20.87	25 018
30	46.97	7 429
60	74.47	2 371

而升高,空气油比则随着含油饱和度增加而降低,分析原因是油墙增大造成的。

参考文献

- [1] 任芳祥,孙洪军,户昶昊.辽河油田稠油开发技术与实践[J].特种油气藏,2012,19(1):1-8.
REN Fangxiang, SUN Hongjun, HU Changhao. Heavy oil development technology and practices in Liaohe Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 1-8.
- [2] 王弥康,张毅,黄善波,等.火烧油层热力采油[M].东营:石油大学出版社,1998:9-18.
WANG Mikang, ZHANG Yi, HUANG Shanbo, et al. Thermal oil recovery from in situ combustion[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1998: 9-18.
- [3] 张方礼.火烧油层技术综述[J].特种油气藏,2011,18(6):1-5.
ZHANG Fangli. An overview of in situ combustion technology [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(6): 1-5.
- [4] 张方礼,刘其成,刘宝良,等.稠油开发实验技术与应用[M].北京:石油工业出版社,2007:1-6.
ZHANG Fangli, Liu Qicheng, LIU Baoliang, et al. Experimental technology and application of heavy oil development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 1-6.
- [5] 潘伟义,王友启,张诗洋,等.晚期注水开发实验研究[J].油气地质与采收率,2018,25(3):122-126.
PAN Weiyi, WANG Youqi, ZHANG Shiyang, et al. An experimental study on late water flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(3): 122-126.
- [6] 李洁,李书光.含油饱和度对纵波速度影响规律的实验研究[J].工程地球物理学报,2012,9(1):21-24.
LI Jie, Li Shuguang. Experimental study of the effect of oil saturation on the P-wave velocity[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(1): 21-24.
- [7] 霍梦颖,邵先杰,武宁,等.浅薄层特超稠油开发后期蒸汽驱注采参数优化[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2017,19(5):35-39.
HUO Mengying, SHAO Xianjie, WU Ning, et al. Optimization of steam flooding injection production parameters in late stage of shallow thin layer super heavy oil development[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 19(5): 35-39.
- [8] 刘薇薇,刘永建,胡绍彬.泡沫辅助蒸汽驱提高采收率实验[J].大庆石油地质与开发,2013,32(2):110-113.
LIU Weiwei, LIU Yongjian, HU Shaobin. Experiment of improving oil recovery by foam assisted steam flooding[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(2): 110-113.
- [9] 曹绪龙,马汉卿,赵修太,等.不同含油饱和度时泡沫的稳定性及调驱机理研究[J].科学技术与工程,2016,16(5):66-70.
CAO Xulong, MA Hanqing, ZHAO Xiutai, et al. Foam stability and mechanism on profile control under different oil saturation [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(5): 66-70.
- [10] 王伟伟.火驱油墙技术界限判定及运移特征[J].特种油气藏,2019,26(4):131-135.
WANG Weiwei. Technical boundary determination and propagation pattern of fire flooding oil wall[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 131-135.
- [11] 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.
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.
- [12] 关文龙,张霞林,席长丰,等.稠油老区直井火驱驱替特征与井网模式选择[J].石油学报,2017,38(8):935-972.
GUAN Wenlong, ZHANG Xialin, Xi Changfeng, et al. Displacement characteristics and well pattern selection of vertical well fire flooding in heavy oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(8): 935-972.
- [13] 程海清,赵庆辉,刘宝良,等.超稠油燃烧基础参数特征研究[J].特种油气藏,2012,19(4):107-110.
CHENG Haiqing, ZHAO Qinghui, LIU Baoliang, et al. Physical simulation research on basic parameters of in-situ combustion for super heavy oil reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(4): 107-110.
- [14] 程海清.火驱高温氧化特征判识方法研究[J].特种油气藏,2018,25(3):135-139.
CHENG Haiqing. Study on identification method of high temperature oxidation characteristics of fire flooding[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 135-139.
- [15] 张方礼,赵庆辉,闫红星,等.指纹分析技术在火驱燃烧状态识别中的应用[J].特种油气藏,2015,22(6):80-84.
ZHANG Fangli, ZHAO Qinghui, YAN Hongxing, et al. Application of signature analysis technique in identification of fire flood combustion state[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 80-84.
- [16] 袁士宝,蒋海岩,王丽,等.稠油油藏蒸汽吞吐后转火烧油层适应性研究[J].新疆石油地质,2013,34(3):303-306.
YUAN Shibao, JIANG Haiyan, WANG Li, et al. Research on adaptability to in-situ combustion in heavy oil reservoir after steam huff and puff[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(3): 303-306.
- [17] 杨智,廖静,高成国,等.红浅1井区直井火驱燃烧区带特征[J].大庆石油地质与开发,2019,38(1):89-93.
YANG Zhi, LIAO Jing, GAO Chengguo, et al. Characteristics of the in-situ combustion zone for the vertical well in well block HQ1[J]. Petroleum Geology & Development in Daqing, 2019, 38(1): 89-93.
- [18] 龚姚进.厚层块状稠油油藏平面火驱技术研究与实践[J].特种油气藏,2012,19(3):58-62.
GONG Yaojin. Technical research and practice of areal fire flooding for thick massive heavy oil reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 58-62.
- [19] 孙洪军,程海清,宋扬.火驱尾气CO₂含量与燃烧状态对应关系研究[J].特种油气藏,2019,26(5):76-80.
SUN Hongjun, Cheng Haiqing, SONG Yang. Relationship between CO₂ content of tail gas and combustion state in fire flooding[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 76-80.
- [20] 袁士宝,宁奎,蒋海岩,等.火驱燃烧状态判定试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(5):114-118.
YUAN Shibao, NING Kui, JIANG Haiyan, et al. Experiments of judging combustion state of in situ combustion[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(5): 114-118.

(编辑 柳超超)