

海上深层块状特稠油 SAGD 开发参数优化研究

张风义 廖 辉 高振南 罗成栋 崔 政 耿志刚 葛涛涛

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459

摘 要:蒸汽辅助重力泄油(SAGD)是稠油油藏开发的有效技术,但由于实施过程中蒸汽热损失较严重,开发经济效益受到影响。为高效地开发这类油藏,模拟特稠油油藏 D 油田的地质特点制备长岩心,并采用油田实际原油开展了注入介质优选和注入参数优化驱替室内实验研究。结果表明,蒸汽中复合注入一定量的 $N_2 + CO_2$ 可有效改善开发效果,最优复合比例为 1 : 3。该研究为 D 油田开发决策提供了依据。

关键词:特稠油;SAGD;物理模拟;开发方式;注入介质;参数优化

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.03.013

Experimental Research on Optimization of Injection Parameters for SAGD Development in Extra-Heavy Oil

Zhang Fengyi, Liao Hui, Gao Zhennan, Luo Chengdong, Cui Zheng, Geng Zhigang, Ge Taotao

Bohai Oil Research Institute, CNOOC China Limited Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: SAGD is the main development method for heavy oil. However, severe heat loss is faced up with during the steam injection process, which causes negative development performance. Therefore, to better develop the extra-heavy oil reservoir, injected fluids, and parameters were optimized using long core physical modelling from the geologic characteristics of oilfield D in extra-heavy oil reservoir. And results have indicated that injected steam mixed with some gas like CO_2 and N_2 can better improve the performance of SAGD, with the best injecting fluids temperature being 300 °C, steam-gas ratio being 1 : 3. And the method is suitable for oilfield D, which is also an example for similar oilfields.

Keywords: Extra-heavy oil; SAGD; Physical modelling; Development method; Injecting fluids; Parameter optimization

0 前言

中国海上具有丰富的稠油资源,其中渤海一半以上的地质储量是稠油,对于这类油藏,目前主要是常规注

水开发^[1-3]。渤海 D 油田原油黏度高,(约 47 °C)黏度为 50 000 mPa · s,是典型的特稠油油藏。针对这类油藏常用的是以蒸汽辅助重力泄油技术为主的开发方式^[4-8],但是蒸汽吞吐开发过程中,注入蒸汽沿程热损失

收稿日期:2018-11-06

基金项目:“十三五”国家重大专项“海上稠油油田高效开发示范工程”(2016 ZX 05058)

作者简介:张风义(1981-),男,河北行唐人,高级工程师,硕士,现从事稠油热采油藏工程方面的研究工作。

比较严重,影响开发效果,且仅通过提高周期蒸汽注入量来增油,也易受经济油气比限制^[9]。国内外研究表明,将蒸汽和非凝析气(主要是天然气、N₂、85 % N₂ 和 15 % CO₂ 的烟道气等)联合混注,能够减少蒸汽需求量,同时改善 SAGD 的开发效果,提高技术经济性。且蒸汽与非凝析气体混注装置占地小,重量轻,特别适合空间及承重受限的海上平台^[10-14]。为更好地指导 SAGD 技术在 D 油田的应用,在前人研究的基础上,本文依据特稠油油藏 D 油田的地质特点制备长岩心,开展了系列研究,对注入介质及注入参数进行了优选,为该油田矿场开发提供决策依据。

1 注热介质优选实验

1.1 实验设计

测试单管长岩心不同驱替介质条件下驱油效果,观察和分析变化规律^[15],优选最佳注入介质组成、比例及注入温度与速度。长岩心模型直径 2.54 cm,模型长度 30 cm。模拟岩心物性参数见表 1,模拟岩心(平行样)不同实验条件下的参数设计见表 2。

表 1 岩心物性参数表

岩心号	孔隙度 /(%)	渗透率 /10 ⁻³ μm ²
1	36.2	3 132
2	36.5	3 730
3	34.5	3 666
4	35.8	3 057
5	36.6	3 854
6	35.4	2 242
7	34.1	4 380
8	32.8	2 550
9	35.2	4 211
10	32.5	3 727
11	33.8	3 178
12	33.2	3 672
13	34.5	3 948
14	32.4	2 712
15	35.3	3 576
16	35.6	3 775

表 2 长岩心驱替实验参数设计

优化参数	参数设计
辅助气体	N ₂ 、CO ₂ 、N ₂ + CO ₂ (85 : 15)
气汽比	1 : 1、1 : 3、1 : 5
注入温度 /℃	50、100、150、200、250、300
注入速度 /(mL · min ⁻¹)	2、3、5、5.2、7

1.2 实验流体

实验所用油样为 D 油田矿场原油(黏度 50 000 mPa · s), N₂、CO₂、蒸汽。

2 实验结果分析

2.1 辅助气体优选

分别研究了以蒸汽 + N₂、蒸汽 + CO₂、蒸汽 + (N₂ + CO₂ (85 : 15)) 为注入介质,注入速度 2 mL /min,注入温度 250 ℃,气汽比 1 : 1,混合注入三种方案下的驱油效果。实验结果见图 1。

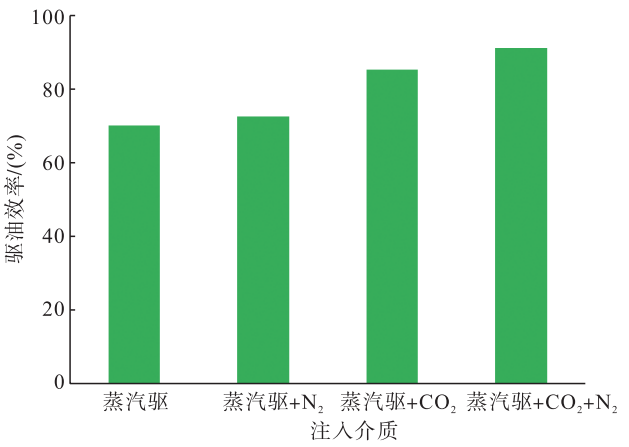


图 1 不同辅助气体条件下的驱油效果

分析图 1 可知,与单纯注蒸汽相比,蒸汽 + N₂、蒸汽 + (N₂ + CO₂)、蒸汽 + CO₂ 驱油效率均有一定程度增加,其中蒸汽 + CO₂ 驱油效率增幅最高。这主要是由于在 N₂ 的作用下能形成良好的隔热层,而 CO₂ 在原油中主要体现为溶解降黏、萃取原油、降低界面张力等,其提高采收率效果优于复合注 N₂ 和 N₂ + CO₂,综合考虑海上气源困难和成本问题,推荐矿场采用蒸汽 + (N₂ + CO₂)^[16-17]。

2.2 气汽比

注入介质包含蒸汽,CO₂,N₂,其共同作用提高稠油采收率。因此其组成对开发效果具有重要影响。模拟了气汽比分别为 1 : 1、1 : 3、1 : 5,其余实验条件不变时的驱油效果,结果见图 2。

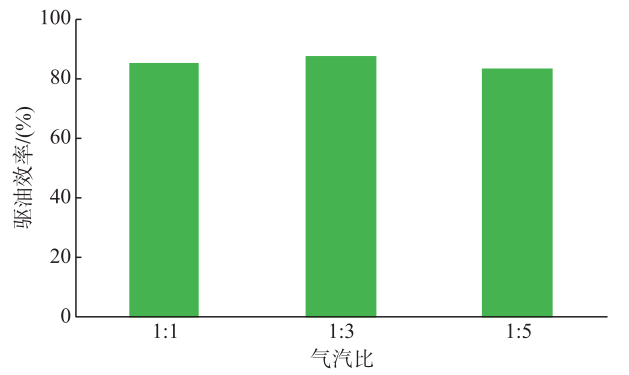


图 2 不同气汽比条件下的驱油效果

分析图2可知,气汽比分别为1:1、1:3、1:5时的驱油效率依次为85.27%、87.53%、83.62%,呈先增加后减小趋势,1:3时开发效果最好。主要是因为气汽比过高时,复合气体占据大量孔隙体积并形成流动相,易导致后期发生气窜,影响最终采收率^[17],因此,气汽比不超过1:3,推荐气汽比为1:3。

2.3 注入温度

注入温度越高,注入介质所含的能量越高,对油层加热效果越好。分别模拟了注入温度为50、100、150、200、250、300℃时的长岩心驱油效果评价实验,注入速度为2 mL/min,见图3。实验结果表明,300℃蒸汽驱油效率的增幅最大。主要是因为随着温度的升高,蒸汽携热量越大,对原油降黏效果越好。此外,温度越高,岩石的弹性膨胀作用越大,受弹性膨胀采出的油越多,因此,温度越高,最终开发效果越好^[17-20]。

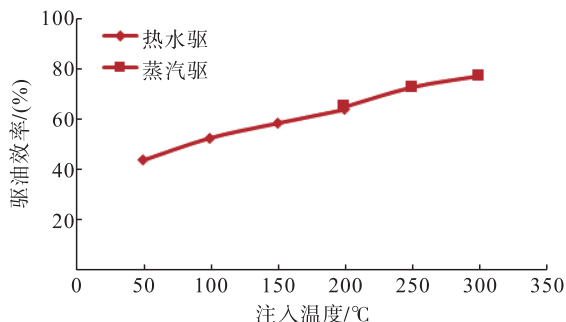


图3 不同注入温度条件下的驱油效果

2.4 注入速度

研究了注入速度分别为2、3.5、5.2、7 mL/min条件下的长岩心驱油评价实验,注入温度为300℃,见图4。结果表明,注入速度对驱油效率有一定影响,驱油效率随注入速度的增加,先增加后减小,3.5 mL/min时驱油效率较高,可能是因为注入速度太大,容易导致气窜,因此,优选注入速度为3.5 mL/min。

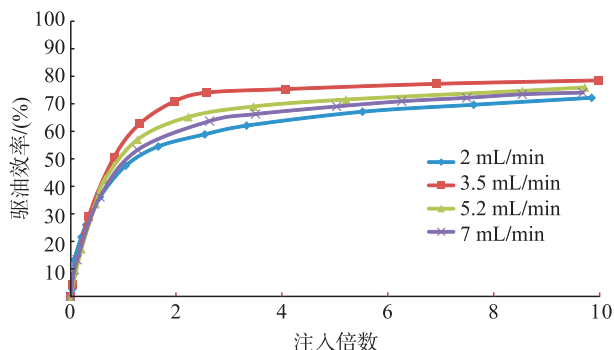


图4 不同注入速度条件下的驱油效果

3 结论

1) 蒸汽复合非凝析气体联合混注,能够减少对蒸汽

的需求,适合海上特稠油开发。

2) 注入最佳热介质组成为蒸汽+CO₂,考虑海上实际情况,推荐矿场采用烟道气,即蒸汽+(N₂+CO₂),注入速度为3.5 mL/min,注入气汽比为1:3,注入温度为300℃。

3) 根据上述开发效果及实验认识,认为渤海D油田特稠油适合采用蒸汽复合气体作为注入介质,并能有效改善开发效果,对同类油田的开发具有一定借鉴意义。

4) 模拟实际油田地质特点制备长岩心、并采用油田实际原油对注入介质优选和注入参数优化的室内驱替实验结果较之数模更为直观和符合实际。

参考文献:

- [1] 王新根,乔卫杰.海上多元热流体热采工艺应用方法研究与实践[J].中外能源,2014,19(3):37-41.
Wang Xingen, Qiao Weijie. Research and Practice of Application Method for Thermal Recovery Technology for Offshore Multiple Thermal Fluid [J]. Sino-Global Energy, 2014, 19 (3): 37-41.
- [2] 刘光成.渤海稠油多元热流体吞吐技术研究[J].长江大学学报(自然科学版),2014,11(10):99-103
Liu Guangcheng. Research on Multiple Thermal Fluids on Enhanced Oil Recovery [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11 (10): 99-103.
- [3] 于天忠,张建国,叶双江,等.辽河油田曙一区杜84块超稠油油藏水平井热采开发技术研究[J].岩性油气藏,2011,23(6):114-119.
Yu Tianzhong, Zhang Jianguo, Ye Shuangjiang, et al. Development Technology with Thermal Recovery for Horizontal Well of Super-Heavy Oil Reservoir in Du 84 Block in Shu 1 Area, Liaohe Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23 (6): 114-119.
- [4] 田利.注38块转换开发方式三维比例模拟技术研究[D].大庆:大庆石油学院,2006.
Tian Li. The Investigation of Transforming Development Regime for Wa-38 Block by Three Dimensional Physically Scaled Simulation [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2006.
- [5] 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 and Gas Reservoirs, 2012, 19 (1): 1-8.
- [6] 王春生,曹海宇.稠油油藏直井组合立体开发实验研究[J].天然气与石油,2017,35(4):25-29.
Wang Chunsheng, Cao Haiyu. Experimental Study on

- Stereoscopic Development with the Combination of Vertical and Horizontal Wells in Heavy Oil Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (4): 25-29.
- [7] 李浩哲,熊彪,张荷,等. 国外稠油油藏单井 SAGD 开发技术综述[J]. 天然气与石油, 2017, 35(1): 84-87.
- Li Haozhe, Xiong Biao, Zhang He, et al. Technical Review on the Development of Single-Well SAGD in Foreign Heavy Oil Reservoirs [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (1): 84-87.
- [8] 李秀雷,刘昊,罗健,等. 非均质油藏双水平井 SAGD 三维物理模拟[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 536-542.
- Li Xiuluan, Liu Hao, Luo Jian, et al. 3D Physical Simulation on Dual Horizontal Well SAGD in Heterogeneous Reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35 (3): 536-542.
- [9] 吴光焕,吴正彬,李伟忠,等. 热化学剂性能评价及辅助水平井蒸汽驱可视化实验[J]. 断块油气田, 2016, 23(5): 658-662.
- Wu Guanghuan, Wu Zhengbin, Li Weizhong, et al. Chemical Performance Evaluation and Visualized Experiment of Thermal Chemical-Assisted Steam Flooding for Horizontal Well [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23 (5): 658-662.
- [10] 祁成祥,姜杰,李敬松. 海上稠油多元热流体吞吐注入参数正交优化[J]. 天然气与石油, 2012, 30(6): 46-48.
- Qi Chengxiang, Jiang Jie, Li Jingsong, et al. Orthogonal Optimization of Huff and Puff Injection Parameters of Offshore Heavy Oil Multiple Thermal Fluid [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (6): 46-48.
- [11] 赵庆辉,刘其成,于涛,等. 蒸汽辅助重力泄油蒸汽腔发育特征研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 123-126.
- Zhao Qinghui, Liu Qicheng, Yu Tao, et al. Research on the Characteristics of Steam Chamber Development of Steam-Assisted Gravity Drainage [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30 (4): 123-126.
- [12] 张凤义,许万坤,吴婷婷,等. 海上多元热流体吞吐提高采收率机理及油藏适应性研究[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 75-78.
- Zhang Fengyi, Xu Wankun, Wu Tingting, et al. Research on the Mechanism of Multi-Thermal Fluids on Enhanced Oil Recovery and Reservoir Adaptability [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21 (4): 75-78.
- [13] 刘志波,程林松,纪佑军,等. 蒸汽与天然气驱(SAGP)开采特征——与蒸汽辅助重力泄油(SAGD)对比分析[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 79-83.
- Liu Zhibo, Cheng Linsong, Ji Youjun, et al. Production Features of Steam and Gas Push: Comparative Analysis with Steam Assisted Gravity Drainage [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38 (1): 79-83.
- [14] 杨兵,李敬松,朱国金,等. 渤海 N 油田普通稠油多元热流体驱可行性研究[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(4): 93-96.
- Yang Bing, Li Jingsong, Zhu Guojin, et al. Feasibility Study of Multiple Thermal Fluid Displacement of Conventional Heavy Oil in Bohai N Oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2014, 28 (4): 93-96.
- [15] 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.
- Zhang Fangli, Liu Qicheng, Liu Baoliang, et al. Technology of Heavy Oil Exploiting Experiments and Its Application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [16] 刘东,李云鹏,张凤义,等. 烟道气辅助蒸汽吞吐油藏适应性研究[J]. 中国海上油气, 2012, 24(增刊 1): 62-66.
- Liu Dong, Li Yunpeng, Zhang Fengyi, et al. Reservoir Applicability of Steam Stimulation Supplemented by Flue Gas [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24 (Suppl 1): 62-66.
- [17] 钟立国,姜瑜,马帅,等. 海上深层特稠油多元热流体辅助重力泄油物理模拟与数值模拟[J]. 中国海上油气, 2015, 27(1): 68-73.
- Zhong Liguang, Jiang Yu, Ma Shuai, et al. Physical and Numerical Simulation of Multi-Component-Thermal-Fluid-Assisted Gravity Drainage in Deep and Extra-Heavy Oil Reservoirs Offshore [J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27 (1): 68-73.
- [18] 杨兵,李敬松,祁成祥,等. 海上稠油油藏多元热流体吞吐开采技术优化研究[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(1): 54-56.
- Yang Bing, Li Jingsong, Qi Chengxiang, et al. Research on Optimized Multiple Thermal Fluids Stimulation of Offshore Heavy Oil Reservoirs [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26 (1): 54-56.
- [19] 冯祥,李敬松,祁成祥. 稠油油藏多元热流体吞吐影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(2): 468-471.
- Feng Xiang, Li Jingsong, Qi Chengxiang. Influence Factors Analysis for Complex Thermal Fluid Simulation in Heavy Oil Reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (2): 468-471.
- [20] 陈建波,刘东. 海上稠油油田热采吞吐后转驱采收率研究[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(4): 46-49.
- Chen Jianbo, Liu Dong. Research on Recovery of Steam Flooding After Thermal Huff and Puff in Offshore Heavy Oilfield [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5 (4): 46-49.