

# 不同助排方式改善蒸汽吞吐效果实验及数值模拟

佟琳<sup>1</sup>, 张国军<sup>1</sup>, 康爱红<sup>2</sup>

(1. 中国石油大庆油田有限责任公司第一采油厂, 黑龙江 大庆 163712;

2. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:** 由于稠油油藏的蒸汽吞吐开发属于降压式衰竭开采, 导致吞吐后期油藏能量不足, 蒸汽超覆严重, 垂向扫油系数低, 开采效果变差。注蒸汽的同时伴注一定量的气体及化学剂辅助蒸汽吞吐可改善流度比, 有效改善稠油油藏的开发效果。利用室内单管实验研究了不同助排方式对蒸汽吞吐效果的影响, 实验结果表明, 与无助排相比, 烟道气泡沫助排驱油效率可提高19%。在此基础上, 利用数值模拟方法对比多种助排方式对蒸汽吞吐效果的影响, 其结果与物理模拟实验结果吻合。综合多方面因素, 烟道气泡沫助排效果最佳, 其次为氮气泡沫助排, 尤其是当地层的非均质性差以及原油粘度较高时, 烟道气泡沫辅助蒸汽吞吐的开发效果更为明显。

**关键词:** 蒸汽吞吐 稠油油藏 添加剂 助排方式 烟道气

中图分类号: TE357.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)02-0093-05

## Experiment of steam stimulation effect improved by different assisted methods and its numerical simulation

Tong Lin<sup>1</sup>, Zhang Guojun<sup>1</sup>, Kang Aihong<sup>2</sup>

(1. No.1 Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing City, Heilongjiang Province, 163712, China;

2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China)

**Abstract:** Because the steam stimulation of heavy oil reservoir belongs to the blowdown depleted development, the reservoir energy can not effectively maintain the supply of liquid and the recovery effect gets worse at later stage of the steam stimulation. Steam overlapping is serious and vertical oil sweep factor is low. Injecting steam with some gas or chemicals to assist the steam stimulation can effectively improve mobility ratio and the development effect of the heavy oil reservoir. The indoor single tube experiment studied the effect of different assisted methods on the steam drive. The results of the experiment showed that the displacement efficiency of flue gas foam assisted steam stimulation could be increased by 19% compared with that of the steam stimulation. Based on these results of physical simulation experiment, numerical simulation methods were used to compare the different influences of different assisted methods on the steam stimulation effect. The results accorded with the results of physical simulation experiments. The recovery effect of flue gas foam assisted steam stimulation was the best considering many kinds of factors followed by nitrogen foam. When the formation heterogeneity was very poor and the oil viscosity was very high, the recovery effect of flue gas foam assisted steam stimulation could be more obvious.

**Key words:** steam stimulation; heavy oil reservoir; additives; assisted method; flue gas

对于大部分稠油油藏, 蒸汽吞吐仍然是主要的开采方式, 其机理主要是加热近井地带的稠油, 使其粘度降低的同时, 消除近井地带油层堵塞, 减少

原油流动阻力而增加油井产量<sup>[1]</sup>。但是随着蒸汽吞吐开采的进行, 尤其是到了中后期, 问题逐渐暴露, 如注入油层的蒸汽向顶部超覆推进及沿高渗透层

收稿日期: 2015-01-15。

作者简介: 佟琳(1985—), 女, 辽宁凌海人, 助理工程师, 硕士, 从事三次采油研究。联系电话: 18245697868, E-mail: 411187190@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金“蒸汽+非凝析气热力泡沫在多孔介质中的运移及滞留机理”(51104165)。

指进,井间存在大量蒸汽难以波及的死油区;随着吞吐周期增加,周期产量、油气比均逐次递减,油藏进入低效或无效吞吐阶段;井间干扰明显,汽窜现象严重等<sup>[2]</sup>。通过将室内实验与数值模拟技术相结合,研究改善蒸汽吞吐效果的助排方式,分析不同助排方式改善蒸汽吞吐效果的机理,并探讨了烟道气泡沫助排方式的影响因素。

## 1 不同助排方式驱油实验及机理

### 1.1 实验方法及流程

为了研究不同助排方式对蒸汽吞吐效果的影响,设计了7种将蒸汽及不同流体混注的单管驱油

实验,吞吐方式包括蒸汽—氮气吞吐、蒸汽—烟道气吞吐、蒸汽—发泡剂吞吐、蒸汽—氮气泡沫吞吐(管外发泡)、蒸汽—氮气泡沫吞吐(管内发泡)、蒸汽—烟道气泡沫吞吐、蒸汽吞吐。

实验用品包括吉林油田提供的油样,质量分数为0.5%的发泡剂,质量浓度为6 654 mg/L的地层水。实验装置(图1)包括平流泵、蒸汽发生器、长度和内径分别为30和2.5 cm的填砂管(内填石英砂)以及中间容器等。其中,填砂管平均孔隙体积为43.7 mL,平均孔隙度为30.2%,平均渗透率为 $328.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,饱和油体积为36.7 mL。实验用砂为80~120目与60~100目按照质量比为2:1混合而成的石英砂。

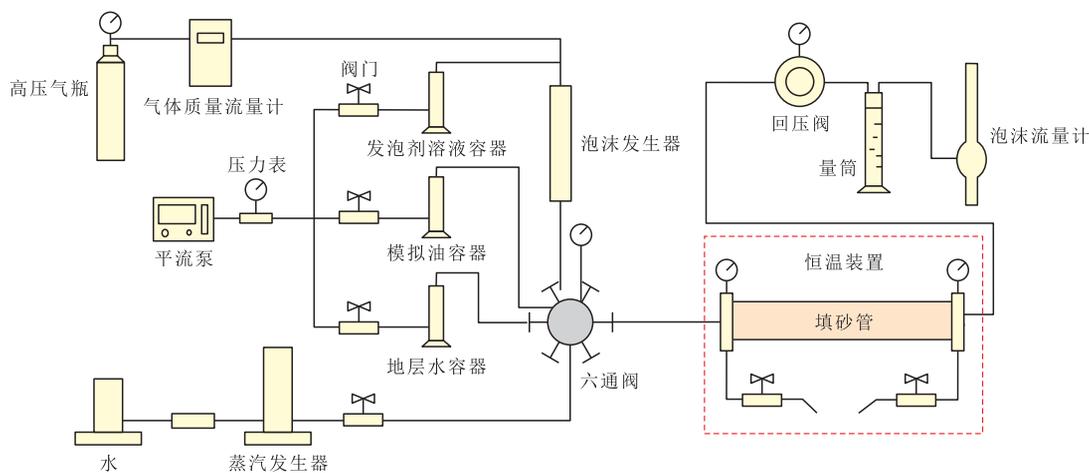


图1 室内单管蒸汽吞吐不同助排方式实验装置示意

Fig.1 Diagram of single tube experimental process for steam stimulation using different assisted methods

实验流程包括:①将混合好的石英砂填入填砂管内,进行安装;②试压30 min,保证整个装置系统不漏气;③向填砂管内注入地层水,计算其孔隙度和绝对渗透率;④饱和原油,计算初始含油饱和度;⑤调节六通阀使添加剂与蒸汽混合进入填砂管,开始驱替。不同的混注实验重复以上流程。

### 1.2 实验结果及分析

对蒸汽吞吐不同助排方式下的驱油效率进行对比,结果表明该值由高到低依次为:烟道气泡沫助排、氮气泡沫(管外发泡)助排、氮气泡沫(管内发泡)助排、发泡剂助排、烟道气助排、氮气助排、无助排。其中,烟道气泡沫助排的蒸汽吞吐效果最明显(图2),与无助排相比,驱油效率可提高19%,残余油饱和度更低,开发效果更好。

### 1.3 机理分析

注入蒸汽中加入氮气、二氧化碳、烟道气等气体助排,由于气体导热能力较低,在油套环空中可起到隔热作用,降低热损失;另外,由于重力分异作

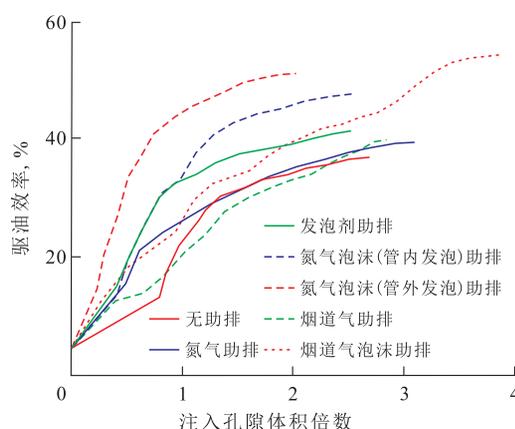


图2 不同助排方式下的驱油效率

Fig.2 Relationship between the displacement efficiency and pore volume using different assisted methods

用,气体上浮形成气顶,减少了蒸汽向顶层的热损失。氮气助排方式中,注入的氮气可以保持地层压力,延长吞吐周期;扩大油层加热带、增加弹性气驱能量;氮气进入地层会优先占据原油孔道,减少死孔隙体积,降低残余油饱和度,从而提高波及系

数<sup>[3]</sup>。二氧化碳或烟道气助排方式中,注入的二氧化碳可以溶解于原油中,降低原油粘度,改善流度比<sup>[4-6]</sup>。注入蒸汽混入烟道气后,则具有二氧化碳和氮气的双重作用,驱替效果更好。

注入蒸汽中加入氮气泡沫或烟道气泡沫。一方面注入发泡剂能大幅度降低油水界面张力,提高洗油效率;同时,形成的泡沫可以改善流度比,遇油消泡,遇水稳定,调整注入剖面,扩大波及体积<sup>[7-9]</sup>。

注蒸汽中注入发泡剂。发泡剂不仅可增强洗油能力<sup>[10]</sup>,而且可同时溶于原油,从而降低原油粘度,提高驱替效率。

## 2 数值模拟

吉林油田扶余油藏的平均埋深为300 m,油层厚度为18 m,有效厚度为12 m,孔隙度为27%,平均渗透率为 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,渗透率变异系数为0.253,

地层原油密度为 $0.879 \text{ g/cm}^3$ ,地层原油粘度为 $60 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,平均含油饱和度为0.58。

### 2.1 蒸汽吞吐助排方式优选

为了对比多种助排方式对蒸汽吞吐效果的改善程度,选取了氮气、烟道气、发泡剂、氮气泡沫(地上)、氮气泡沫(地下)、烟道气泡沫和无助排7种助排方式进行对比。通过数值模拟对各种助排方式的累积产油量进行对比,此外经济因素也不能忽略,各种添加成分的成本分别为:蒸汽60元/t、氮气3元/ $\text{m}^3$ 、烟道气1.56元/ $\text{m}^3$ 、发泡剂 $1.4 \times 10^4$ 元/t、原油3000元/t。数值模拟结果(表1)表明,泡沫助排好于纯气体助排,其中烟道气泡沫助排方式下的累积增油量最大,其次是氮气泡沫(地上)助排,再考虑经济因素扣除成本之后,最佳的助排方式为烟道气泡沫助排,这与室内的单管驱油实验结果吻合。所以,通过室内实验和数值模拟综合分析,最佳的助排方式为烟道气泡沫助排。

表1 蒸汽吞吐不同助排方式的数值模拟结果  
Table1 Results of numerical simulation using different assisted methods

助排方式	累积增油量/t	注蒸汽量/t	注发泡剂量/t	注氮气量/ $10^4 \text{ m}^3$	注烟道气量/ $10^4 \text{ m}^3$	收益/ $10^4$ 元	成本/ $10^4$ 元	净收益/ $10^4$ 元
无助排	453.1	1 876	0	0	0	135.9	11.3	124.6
氮气助排	573.0	1 876	0	1.4	0	171.9	11.3	160.6
烟道气助排	634.9	1 876	0	0	1.4	190.4	11.2	179.2
发泡剂助排	722.0	1 876	4.2	0	0	216.6	17.2	199.4
烟道气泡沫助排	1 139.0	1 876	4.2	0	1.4	341.7	19.3	322.43
氮气泡沫(地上)助排	1 107.2	1 876	4.2	1.4	0	332.1	21.3	310.8
氮气泡沫(地下)助排	849.3	1 876	4.2	1.4	0	254.7	21.3	233.4

### 2.2 烟道气泡沫助排蒸汽吞吐影响因素

渗透率变异系数 油层的非均质程度是影响泡沫助排蒸汽吞吐效果的重要因素,而渗透率变异系数是反映油层非均质性的指标。对洛伦兹曲线反算求解得到不同非均质性油藏渗透率分布情况,从而能够直观描述油藏的非均质性,洛伦兹系数取0.1,0.3,0.5,0.7,0.9。在混注比、注汽速度、周期注汽量、周期注汽增量和焖井时间相同的条件下,由不同渗透率变异系数下第1周期蒸汽吞吐和第2周期蒸汽—烟道气泡沫吞吐开采效果影响的数值模拟结果(图3)可见,随着地层非均质性的增强,蒸汽吞吐的效果逐渐变差;而采用助排方式后,由于烟道气泡沫具有遇油消泡、遇水起泡的特性,从而可以封堵高渗透层,起到调剖堵水的效果;但该封堵效果是有限的,当渗透率变异系数增加到某个程度时,则会发生汽窜,导致产量下降。

地层韵律性 地层韵律性对蒸汽吞吐泡沫助

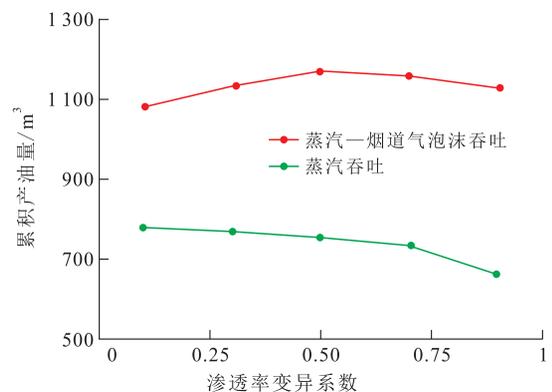


图3 不同渗透率变异系数对开发效果的影响

Fig.3 Influence of the coefficient of variation on development effect

排效果有很大影响。在相同的注采参数条件下,由正韵律、反韵律和复合韵律对蒸汽吞吐和蒸汽—烟道气泡沫吞吐效果的影响(图4)可以看出,在平均渗透率相同的情况下,均质地层的蒸汽吞吐效果最好,而在加入烟道气泡沫后,复合韵律地层的采出

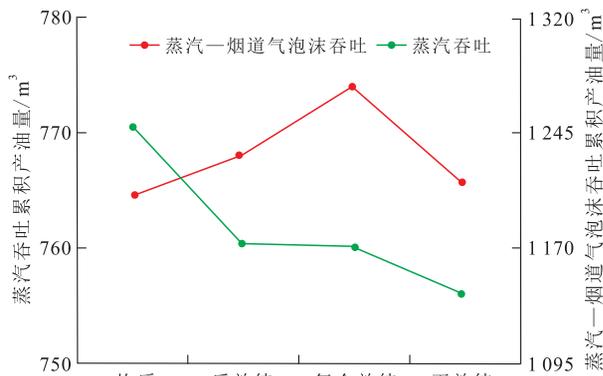


图4 地层韵律性对开发效果的影响

Fig.4 Influence of formation rhythm on development effect

程度最高。

**原油粘度** 原油粘度对蒸汽吞吐的开采效果影响较大。选择了5种原油,在50℃下的粘度分别为173, 126.4, 79.7, 47.4和31.6 mPa·s,进行数值模拟计算。在相同的油层参数和注汽参数下,由不同原油粘度对蒸汽吞吐和蒸汽—烟道气泡沫吞吐效果影响的数值模拟结果(图5)可以看出,对于高粘度的原油,烟道气泡沫助排的开发效果要明显好于单纯的蒸汽吞吐,这是因为二氧化碳具有降粘作用以及发泡剂具有降低界面张力的作用;而对于低粘度原油,烟道气泡沫助排的增产效果不明显。

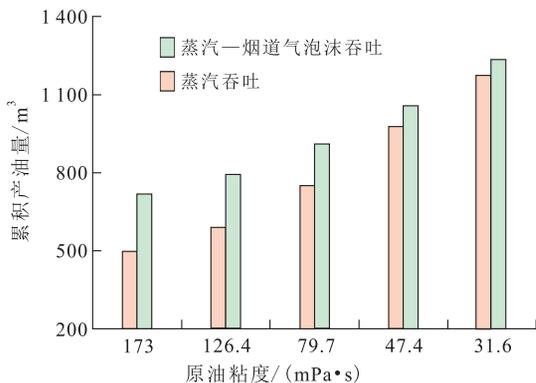


图5 原油粘度对开发效果的影响

Fig.5 Influence of crude oil viscosity on development effect

**注入方式** 选取2种注入方式:①连续注入,即将1个大的烟道气泡沫段塞连续注入地层;②段塞注入,即将1个大的烟道气泡沫段塞分成2~3个小段塞注入地层。数值模拟结果表明,在相同的地质条件和注入参数下,连续注入要好于段塞注入。

**注汽参数** 注汽参数主要包括混注比、注汽速度、周期注汽量、周期注汽增量、焖井时间和注汽干度。混注比是指注入气体的体积量与注入蒸汽的体积量的比值,一般取值为1:1~1:1.5。注汽速度的选择应在注汽设备正常工作的条件下,以油层破裂压力为限制选择注汽压力,然后根据油层的吸气

能力确定最大注汽速度<sup>[1]</sup>。周期注汽量通常根据每米有效厚度选定,初期的经验值为80~140 t/m。周期注汽增量一般为15%~20%。注汽干度一般越大越好,在矿场条件允许的情况下,应尽可能提高井底注汽干度。焖井时间不宜过长,一般为2~3 d,最长不要超过7 d。

### 3 现场应用

根据吉林油田不同井区地质特点进行了不同助排方式试验,主要的助排方式有:氮气助排、烟道气泡沫助排、发泡剂助排。吉林油田FP74井砂岩平均厚度为10.6 m,有效厚度为8 m,孔渗条件均好于其他热采区块。2006年10月该井第1周期采用蒸汽吞吐开采,周期生产天数达487 d,第2周期采用氮气助排后,截至2010年12月,共生产753 d,累积产液量为8 366.1 t,累积产油量为3 394 t,平均产油量为4.5 t/d,累积增油量为2 128.7 t。与蒸汽吞吐的产液量为6.7 t/d,产油量为1.6 t/d相比,提高程度较大。DFP107和DFP124井砂岩平均厚度为6~8 m,有效厚度为2.7 m,孔渗条件均一般,第1周期这2口井同时注蒸汽,存在注汽量分配不均现象,热采效果较差。其中,DFP107井不出油,DFP124井产油量为0.4 t/d。针对这2口井进行烟道气泡沫助排对比试验,累积产液量为2 971.1 t,累积产油量为812.5 t,平均增油量为793.1 t,平均产油量为21.3 t/d,较第2轮施工前产油量有较大程度提高,效果非常明显。在DFP123井进行发泡剂助排对比试验,累积产液量为4 400.7 t,累积产油量为620.8 t,有效生产369 d,累积增油量为479.8 t,平均产油量为1.7 t/d,与单纯蒸汽吞吐的产油量为0.5 t/d相比,提高幅度大,取得了较好的助排试验效果。现场试验效果证实,烟道气泡沫助排增产效果很明显,与室内实验及数值模拟结果完全吻合。

### 4 结论

通过室内实验和数值模拟多种助排方式,分析不同助排方式对开采效果的影响,优选出合理的助排方式为烟道气泡沫助排,该方式下蒸汽吞吐效果得到较大改善。

地层的非均质性和原油粘度对蒸汽吞吐及蒸汽—烟道气泡沫吞吐开采效果的影响较大,尤其是在较复杂的油层并且原油粘度较高的情况下,使用烟道气泡沫助排效果较好。

对注汽参数进行了优选,混注比为1:1~1:1.5,周期注汽量为80~140 t/m,周期注汽增量为15%~20%,焖井时间为2~3 d。

现场应用中,烟道气泡沫助排蒸汽吞吐效果非常明显,例如DFP107井与DFP124井第2周期进行烟道气泡沫助排后,平均产油量为21.3 t/d,较第2轮施工前DFP107井不出油和DFP124井产油量为0.4 t/d有较大程度提高。

#### 参考文献:

- [1] 刘慧卿,范玉平,赵东伟,等.热力采油技术原理与方法[M].东营:石油大学出版社,2000:64-65.  
Liu Huiqing, Fan Yuping, Zhao Dongwei, et al.Principle and method of thermal recovery technology [M].Dongying: University of Petroleum Press, 2000:64-65.
- [2] 付美龙,黄俊.低渗透油藏水驱转空气泡沫驱提高采收率物理模拟实验[J].油气地质与采收率,2014,21(5):104-106.  
Fu Meilong, Huang Jun.Physical modeling study of air foam flooding EOR technology for low permeability reservoirs based on water flooding [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(5):104-106.
- [3] 高永荣,刘尚奇,沈德煌,等.超稠油氮气溶剂辅助蒸汽吞吐开采技术研究[J].石油勘探与开发,2003,30(2):73-75.  
Gao Yongrong, Liu Shangqi, Shen Dehuang, et al.Study on N<sub>2</sub> and solvent assisted steam stimulation in a super-heavy oil reservoir [J].Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2):73-75.
- [4] 孙建芳,刘东,李丽,等.孤岛油田驱油剂辅助蒸汽驱对稠油性质的影响[J].油气地质与采收率,2014,21(3):55-57.  
Sun Jianfang, Liu Dong, Li Li, et al.Study on interaction of displacement agent assisted steam flooding for Gudao viscous crude oil[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(3):55-57.
- [5] 杨阳,刘慧卿,庞占喜,等.孤岛油田底水稠油油藏注氮气辅助蒸汽吞吐的选区新方法[J].油气地质与采收率,2014,21(3):58-61.  
Yang Yang, Liu Huiqing, Pang Zhanxi, et al.A new method of selecting zone for nitrogen-assisted steam stimulation in heavy oil reservoir with bottom water in Gudao oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(3):58-61.
- [6] 孙建芳.氮气及降粘剂辅助水平井热采开发浅薄层超稠油油藏[J].油气地质与采收率,2012,19(2):47-49,53.  
Sun Jianfang.Study and application on HDNS technology to develop shallow and thin super heavy oil reservoirs [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(2):47-49,53.
- [7] 张广卿,刘伟,李敬,等.泡沫封堵能力影响因素实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):44-46.  
Zhang Guangqing, Liu Wei, Li Jing, et al.Experimental study on the factors influencing the blocking ability of foam [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(2):44-46.
- [8] 庞占喜,程林松,李春兰.热力泡沫复合驱提高稠油采收率研究[J].西南石油大学学报,2007,29(6):71-74.  
Pang Zhanxi, Cheng Linsong, Li Chunlan.Enhance heavy oil recovery with thermal foam flooding [J].Journal of Southwest Petroleum University, 2007,29(6):71-74.
- [9] 张军涛,吴晓东,李波,等.稠油冷采泡沫油溶解气驱油藏开发动态数值模拟[J].油气地质与采收率,2012,19(3):81-83.  
Zhang Juntao, Wu Xiaodong, Li Bo, et al.Study of numerical simulation of dissolved gas reservoir for foam cold recovery of heavy oil [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(3):81-83.
- [10] 刘广友.孤东油田九区稠油油藏化学蒸汽驱提高采收率技术[J].油气地质与采收率,2012,19(3):78-80,83.  
Liu Guangyou.Study on chemical steam flood to enhance recovery ratio of ninth block of Gudong oilfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(3):78-80,83.

编辑 刘北羿