

# 稠油油藏蒸汽泡沫调驱物理模拟实验

——以吉林油田扶北3区块为例

王长久,刘慧卿,郑强,林士尧

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

**摘要:**针对稠油油藏蒸汽驱过程中压力维持困难和汽窜导致热效率下降等问题,开展了蒸汽泡沫调驱物理模拟实验。根据吉林油田扶北3区块的地质特点,设计了非均质双管并联驱替模型,将不同调驱方式下的驱油效率和分流量进行了对比。结果表明,在蒸汽混注泡沫调驱的过程中,注入发泡剂或泡沫能在一定程度上封堵高渗透管,启动低渗透管内的剩余油,其驱油效果好于其他驱替方式;蒸汽混注高温气体调驱的驱油效果略好于蒸汽驱,仅提高采收率约1%~3%。此外,泡沫对双管模型进行了有效的调整分流,使高渗透管和低渗透管的产液量趋于均匀,表明泡沫驱符合非均质地层的驱替要求。综合比较认为蒸汽混注混合气泡沫调驱适用于扶北3区块,其综合驱油效率可达54.8%,比单纯蒸汽驱提高30.7%。

**关键词:**稠油油藏 蒸汽泡沫驱 驱油效率 调驱 物理模拟 混合气泡沫驱

**中图分类号:**TE357.42

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2013)05-0076-03

稠油油藏蒸汽驱开采过程中通常存在2方面的问题:①油藏转驱前的吞吐开采使地层压力下降较快,只靠注蒸汽不能长久地保持和补充地层压力;②蒸汽和原油的流动能力差异较大,在蒸汽驱过程中会出现蒸汽超覆和单层突进等现象,大大降低了蒸汽的利用率<sup>[1-2]</sup>。

蒸汽混注不同流体调驱,可以调整热采井的吸汽剖面,扩大蒸汽波及体积并改善洗油效果,提高蒸汽的利用率<sup>[3-5]</sup>。范耀等通过室内实验和矿场试验证明,注入气体辅助蒸汽驱可改善汽驱效果<sup>[6-8]</sup>。泡沫流体具有遇油消泡、遇水稳定的性能,在多孔介质中具有较高视粘度,且随着渗透率的增大而增大<sup>[9-10]</sup>。吕广忠等通过研究证明,在驱替流体中加入泡沫剂,能够有效地使注入流体转向,改善波及体积,提高驱油效率,同时降低含水率<sup>[11-12]</sup>。李兆敏等通过泡沫封堵性及选择性分流实验认为,泡沫在非均质岩心中的流动具有选择性,具有较好的暂堵分流效果<sup>[13-14]</sup>。据此,结合吉林油田扶北3区块的地质特点,笔者设计了非均质双管并联驱替模型,对蒸汽混注不同流体调驱的驱油效率和分流量进行了实验对比,以探求有效改善蒸汽驱效果的驱替方式。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验设备主要包括一维填砂管模型、蒸汽发生器、蒸汽与不同流体混注系统、流体饱和系统与数据采集系统。根据吉林油田扶北3区块的实际情况,设计了填砂管模型,管内充填80~120目与60~100目以体积比为2:1混合而成的石英砂,填砂压实程度与设计渗透率有关,填砂管长度为30 cm,内径为2.5 cm,最大承载压力为32 MPa;蒸汽发生器的最大排量为20 L/h,最高输出温度为350 ℃;ISCO高压恒压恒速泵的最大排量为60 mL/min,最大承载压力为70 MPa;恒温箱的最高温度为150 ℃。实验用油为吉林油田FB 3-18井的脱气原油,使用前经过油水分离处理,50 ℃脱气原油粘度为375 mPa·s。实验用水是根据现场水样分析资料配制的。实验用发泡剂质量分数为0.5%,气液比为1:1。

### 1.2 实验方法

将人工填制的填砂管模型按驱替流程连接、安装、调试,采用驱替泵使填砂管饱和水,计量压差,计算填砂管物性参数(表1)。采用的驱替方式包

收稿日期:2013-07-20。

作者简介:王长久,男,在读博士研究生,从事提高采收率技术等方面的研究。联系电话:(010)89731163,E-mail:jiuchangwang@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“蒸汽驱后稠油油藏提高采收率技术研究”(2011ZX05009-004-05)。

括:蒸汽驱、蒸汽混注发泡剂调驱、蒸汽混注高温气体泡沫调驱和蒸汽混注高温气体调驱,其中,高温气体泡沫调驱包括自生气泡沫调驱、混合气泡沫调驱和氮气泡沫调驱;高温气体包括氮气、混合气和自生气。蒸汽混注发泡剂调驱的过程是:蒸汽驱至高渗透管含水率为90%—0.2倍孔隙体积的发泡剂驱—后续蒸汽驱至高渗透管含水率为98%;蒸汽混注高温气体泡沫调驱的过程是:蒸汽驱至高渗透管含水率为90%—0.2倍孔隙体积的高温气体泡沫调驱—后续蒸汽驱至高渗透管含水率为98%;蒸汽混注高温气体调驱过程是:蒸汽驱至高渗透管含水率为90%—蒸汽混注高温气体调驱至高渗透管含水率为98%。

表1 填砂管物性参数

驱替方式	填砂管	孔隙体积/cm <sup>3</sup>	孔隙度,%	渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	饱和油体积/cm <sup>3</sup>	含油饱和度,%
蒸汽驱	高渗透	45.0	30.6	525.0	42.1	93.6
	低渗透	44.6	30.3	178.0	39.5	88.6
蒸汽混注发泡剂调驱	高渗透	45.0	30.6	493.0	41.8	92.9
	低渗透	44.0	29.9	175.0	39.0	88.6
蒸汽混注自生气泡沫调驱	高渗透	44.7	30.4	498.0	43.0	96.2
	低渗透	44.2	30.0	185.0	39.5	89.4
蒸汽混注混合气泡沫调驱	高渗透	45.5	30.9	516.0	43.5	95.6
	低渗透	44.0	29.9	170.0	38.4	87.3
蒸汽混注氮气泡沫调驱	高渗透	45.4	30.8	503.0	42.7	94.1
	低渗透	43.8	29.8	173.0	38.3	87.4
蒸汽混注氮气调驱	高渗透	45.0	30.5	506.0	42.3	94.0
	低渗透	44.0	29.9	175.0	40.0	90.9
蒸汽混注混合气调驱	高渗透	45.7	31.0	516.0	42.5	93.0
	低渗透	44.0	29.9	180.0	39.8	90.5
蒸汽混注自生气调驱	高渗透	45.3	30.8	508.0	42.0	92.7
	低渗透	44.2	30.0	179.0	40.3	91.2

双管模型驱油效率对比及分流量实验流程(图1)为:采用驱替泵向饱和水的填砂管饱和原油,将

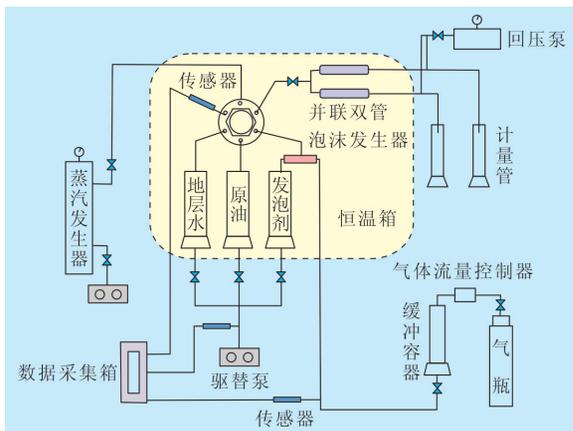


图1 蒸汽泡沫调驱实验流程示意

不同渗透率的双管并联接入流程后,采用不同驱替方式进行驱替,直至实验结束。记录各个实验阶段的注入压力和产出液体积等。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 蒸汽混注泡沫调驱驱油效果

由蒸汽混注泡沫调驱的驱油效率和含水率的关系(图2)可见,不论是蒸汽混注发泡剂调驱还是蒸汽混注高温气体泡沫调驱的驱油效率都明显高于单纯蒸汽驱,其中蒸汽混注混合气泡沫调驱的驱油效率最高,主要是因为混合气作为引发剂,与发泡剂混合后可以生成大量的泡沫,有利于改善原油流变性,降低原油粘度,提高洗油效率。同时,混合气在地层中可以降低原油粘度,扩大蒸汽在油层中的加热半径,从而提高驱替波及系数。

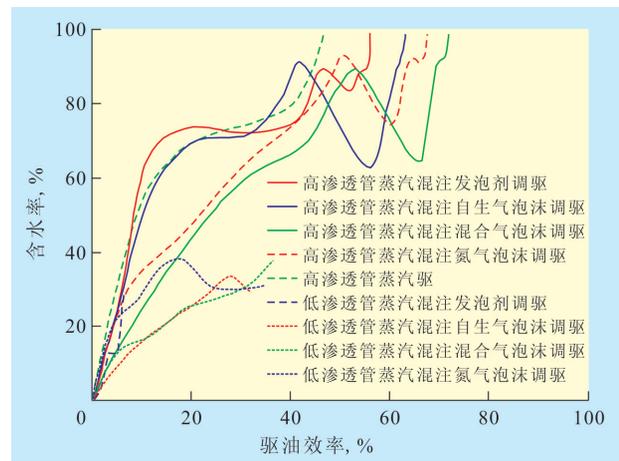


图2 蒸汽混注泡沫调驱的驱油效率与含水率的关系

与单纯蒸汽驱相比,蒸汽混注高温气体泡沫调驱的含水率上升速度明显变慢,主要是因为泡沫体积效应产生的封堵性,增大了渗流阻力,使蒸汽缓慢均匀地推进,有效抑制了含水率的上升。在蒸汽驱过程中,未能启动低渗透管,而在调驱过程中注入发泡剂或泡沫能够在一定程度上封堵高渗透管,增大高渗透管的渗流阻力,调整液流使其转向阻力小的低渗透管,启动低渗透管内的剩余油,提高综合驱油效率。

### 2.2 蒸汽混注高温气体调驱驱油效果

由高渗透管蒸汽混注高温气体调驱时的驱油效率和含水率的关系(图3)可以看出,蒸汽混注高温气体调驱的驱油效率高于单纯蒸汽驱,其原因是一方面气体的存在利于降低原油粘度,另一方面压力的增加也利于启动和驱替更多的粘度较大的残余油,提高洗油效率。

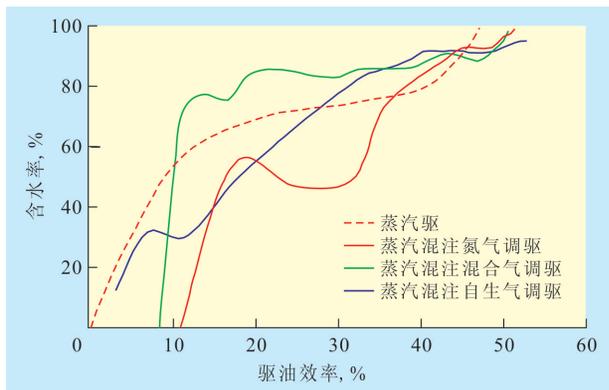


图3 高渗透管蒸汽混注高温气体调驱时的驱油效率与含水率的关系

蒸汽混注高温气体调驱的过程中,由于气体沿着高渗透管窜流,未能启动低渗透管内的剩余油,故蒸汽混注高温气体调驱的综合驱油效率仅比单纯蒸汽驱高约1%~3%,调驱效果不如蒸汽混注泡沫调驱。

### 2.3 蒸汽混注泡沫调驱分流效果

蒸汽驱时高渗透管的产液率(即单管产液量与双管总产液量之比)为100%,采出的油量均来自高渗透管,蒸汽易沿高渗透管窜流,导致低渗透管内的剩余油启动困难,动用程度低,高、低渗透管产液量不均匀,综合驱油效率低。由不同调驱方式下高、低渗透管产液率随注入孔隙体积倍数的变化(图4)可见,当注入泡沫进行调驱后,随着注采压差上升,低渗透管启动且产液量上升,高渗透管产液量下降,高、低渗透管的产液量趋于均匀,模型的非均质程度降低;蒸汽混注高温气体泡沫调驱后的产液量趋于均匀的速度明显快于蒸汽混注发泡剂调驱,证明高温气体泡沫调驱的分流效果较好,调整非均质能力更强。泡沫调驱分流效果由好到差依次为蒸汽混注混合气泡沫调驱、蒸汽混注自生气泡沫调驱、蒸汽混注氮气泡沫调驱、蒸汽混注发泡剂调驱。

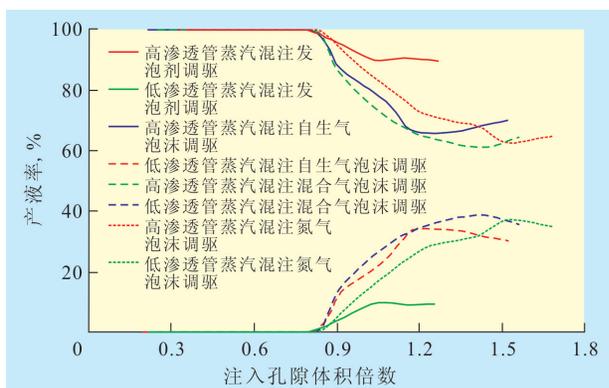


图4 不同调驱方式下高、低渗透管产液率和注入孔隙体积倍数的关系

### 2.4 驱油效率对比

由不同驱替方式的驱油效率(表2)可以看出,对于蒸汽驱,高渗透管驱油效率为46.8%,双管渗透率级差导致蒸汽沿高渗透管窜流,低渗透管未启动,故综合驱油效率很低,仅为24.1%。综合驱油效率由高到低依次为:蒸汽混注高温气体泡沫调驱、蒸汽混注发泡剂调驱、蒸汽混注高温气体调驱、蒸汽驱。

驱替方式	高渗透管	低渗透管	综合值	与蒸汽驱相比提高值
蒸汽驱	46.8		24.1	
蒸汽混注发泡剂调驱	56.0	6.4	32.1	8.0
蒸汽混注自生气泡沫调驱	55.3	31.9	44.1	20.0
蒸汽混注混合气泡沫调驱	71.3	36.2	54.8	30.7
蒸汽混注氮气泡沫调驱	67.6	34.5	52.0	27.9
蒸汽混注氮气调驱	48.9		25.2	1.1
蒸汽混注混合气调驱	50.4		26.0	1.9
蒸汽混注自生气调驱	52.6		26.9	2.8

注:蒸汽驱、蒸汽混注氮气调驱、蒸汽混注混合气调驱和蒸汽混注自生气调驱的低渗透管未启动。

蒸汽混注泡沫调驱的效果均好于单纯蒸汽驱和蒸汽混注高温气体调驱的效果。调驱效果由高到低依次是蒸汽混注混合气泡沫调驱、蒸汽混注氮气泡沫调驱、蒸汽混注自生气泡沫调驱、蒸汽混注发泡剂调驱、蒸汽混注自生气调驱、蒸汽混注混合气调驱、蒸汽混注氮气调驱。

## 3 结论

双管模型驱油效率对比及分流量物理模拟实验结果表明,不同驱替方式的综合驱油效率由高到低依次是蒸汽混注高温气体泡沫调驱、蒸汽混注发泡剂调驱、蒸汽混注高温气体调驱、蒸汽驱;与单纯蒸汽驱相比,不同驱替方式提高驱油效率由高到低依次是蒸汽混注混合气泡沫调驱、蒸汽混注氮气泡沫调驱、蒸汽混注自生气泡沫调驱、蒸汽混注发泡剂调驱、蒸汽混注自生气调驱、蒸汽混注混合气调驱、蒸汽混注氮气调驱。

在蒸汽驱过程中,注入发泡剂和泡沫能在一定程度上封堵高渗透管,启动低渗透管,有效抑制含水率的上升,提高综合驱油效率。注入高温气体,既可降低原油粘度,也可以提高驱替压力,但易沿高渗透层发生窜流,导致提高驱油效率不明显。双管模型经过泡沫段塞的调驱后,泡沫有效地发挥了

(下转第83页)