

# 泡沫复合驱应用方案的模拟评价

于会宇<sup>1,2,3</sup>, 黄梅<sup>2</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. 大庆油田有限责任公司第三采油厂, 大庆 163113; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100044)

**摘要:**在泡沫复合驱油矿场试验过程中, 由于压缩机注入压力以及现有注采工艺技术的限制, 导致泡沫复合驱实际应用方案与实验方案有很大差异。为了正确评价试验效果, 本文对泡沫复合驱应用方案进行了室内模拟评价, 认为气液比是影响驱替效果最为重要的因素。随着气液比的下降, 最终采出程度是下降的, 气液交替周期对泡沫复合驱的影响非常明显。同时还进行了不同渗透率油层泡沫复合驱效果、泡沫复合驱和普通的三元复合驱油效果对比评价, 认为相比于普通的 ASP 复合驱, 泡沫复合驱技术具有明显的优势。这一试验对今后泡沫复合驱技术的进一步发展具有意义。

**关键词:**泡沫复合驱; 应用方案; 模拟评价

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2006)02-0145-05

泡沫复合驱是在泡沫驱和三元复合驱基础上发展起来的一种新的提高采收率的驱油方法。应用泡沫复合体系驱油既能大幅度降低油水之间的界面张力, 提高驱替效率, 又能降低油水流度比, 提高波及系数。室内研究资料表明: 泡沫复合驱采收率较水驱提高了 30% (OOIP) 左右<sup>[1~3]</sup>。为了进一步验证泡沫复合体系在矿场的驱油效果, 大庆油田于 1997 年以来在萨北开发区北二东地区的原水气交替驱油试验结束后的萨 III<sub>3</sub>-7 油层, 采用 6 注 16 采五点法面积井网进行了先导性矿场试验。在试验进行过程中, 由于压缩机注入压力以及现有注采工艺技术的限制, 导致泡沫复合驱实际应用方案与实验方案有很大差异。因此, 为了正确评价试验效果, 笔者以室内模拟现场试验实际为主, 同时对可能的影响泡沫复合驱效果的因素进行了对比实验研究, 希望为今后泡沫复合驱技术的进一步发展提供借鉴指导意义。

## 1 实验仪器及条件

### 1.1 实验药品及仪器

**岩芯:**实验所用岩芯为模拟野外岩心而成的三层非均质人造岩芯, 渗透率变异系数为

0.72, 平均气测渗透率为 1.5、1.0、0.5  $\mu\text{m}^2$ 。

**化学药剂:**表面活性剂 ORS41 (50% 活性含量)、现场提供, 主要成分是重烷基苯磺酸钠和异丙醇; 部分水解聚丙烯酰胺 HPAM, 分子量 1 500 万, 现场提供; 氢氧化钠 (NaOH) 均为化学纯; 气源: 标准天然气。实验所用原油、配制复合体系的水为现场提供。

**实验仪器设备:**RUSKA 驱替泵 (美国)、柱塞泵、回压阀 (美国)、气液分离计量装置、气体体积流量计 (美国)、活塞压力容器、高压岩芯夹持器、恒温系统、高压中间容器、界面张力仪、搅拌机以及常规化学实验仪器和设备。

### 1.2 实验条件及实验程序

**实验条件:**①温度: 大庆油田平均油层温度 (45  $^{\circ}\text{C}$ ); ②压力: 三厂试验区地层压力 2 200 PSI (13 MPa); ③注入速度: 模拟现场条件, 每天线性速度推进 1 m, 折算室内注入量为 20 ml/h。

**实验程序:**将物理模型抽空 6 小时, 饱和原始地层水 (矿化度 6 778 mg/L), 水测渗透率, 高压下饱和含气原油, 测定原始含油饱和度, 水驱至实验方案要求的采出程度 (31%), 按设计的实验方案, 交替注入水和气, 以及交替注入三元复合体系 (主、副段塞) 和天然气 (泡沫驱), 在聚

收稿日期: 2006-02-01

基金项目: 中国科学院边缘海地质重点实验室研究基金项目 (MSGL04-8)

作者简介: 于会宇 (1963-), 高级工程师, 在读博士, 石油构造地质专业, E-mail: yuhuiy@petrochina.com.cn;

万方数据

1672-4135(2006)02-0145-05

合物保护段塞后水驱至结束。

### 1.3 实验流程

实验流程与现场试验阶段完全一致,即分为 3 个阶段:前期水驱空白阶段,化学驱阶段和后续水驱阶段,其中化学驱阶段分为 3 个段塞注入,三元主段塞、三元副段塞和后续聚合物保护段塞。因此,为使实验结果更具有指导意义,本次室内实验过程中所采用的各化学药剂、气源、注入水和饱和油都是现场提供,与矿场试验所用完全一致,实验流程也是根据现场注入流程设计,尽量使室内实验各环节与现场保持一致。

## 2 室内模拟评价

### 2.1 气液比变化对采出程度的影响

气液比俗称泡沫质量,是影响泡沫性能的重要参数之一<sup>[4~6]</sup>。为了解决主、副段塞中气液比对采出程度的影响,在保证泡沫复合驱实验前采出程度基本相同的条件下,只改变气液比的大小,设计了四个方案:A 主、副段塞的气液比皆为 1:1;B 主段塞的气液比为 0.39:1、副段塞的气液比为 2.53:1;C 主段塞的气液比为 0.39:1、副段塞的气液比为 1:1;D 主段塞的气液比为 0.39:1、副段塞的气液比为 0.25:1。所做的物理模拟实验结果如表 1 所示。从图 1 可以

看出,随着气液比的下降,最终采出程度是下降的。而且,主段塞气液比的变化对采出程度的影响更大,如方案 A 与方案 C 比较,副段塞的气液比都是 1:1,主段塞的气液比由 1:1 降为 0.39:1,使得此阶段的采出程度下降了近 10 个百分点。但是,当主段塞的气液比固定时,副段塞的气液比变化对采出程度的影响幅度却不大,如方案 B、C、D,主段塞的气液比固定为 0.39:1,而副段塞的气液比则由 2.53:1 到 1:1、0.25:1,相应的采出程度降低幅度很小,每个间隔的差别不足 3 个百分点,且越往后差别越小。

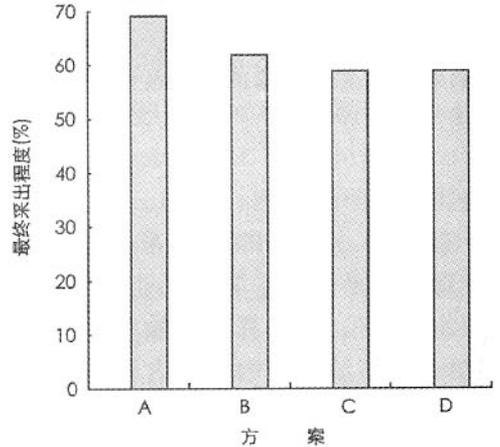


图 1 不同方案下的驱油效率

Fig. 1 Diagram showing the oil-mining efficiency under the different project

表 1 气液比变化对采出程度的影响统计表

Table 1 Statistics showing the effect of gas/liquid ratio on oil recovery

编号	方案		水驱阶段增加采出程度 (%)	水气交替驱结束采出程度 (%)	主段塞阶段增加采出程度 (%)	副段塞阶段增加采出程度 (%)	保护段塞驱增加采出程度 (%)	后续水驱增加采出程度 (%)	最终采出程度 (%)
	主段塞气液比	副段塞气液比							
A	1:1	1:1	31.15	44.36	15.7	6.66	1.43	0.95	69.08
B	0.39:1	2.53:1	31.5	44.75	5.97	8.47	1.91	0.72	61.82
C	0.39:1	1:1	31.31	44.8	6.08	5.75	1.55	0.77	58.85
D	0.39:1	0.25:1	31.33	43.75	7.26	4.59	2.00	1.15	58.75

### 2.2 泡沫复合驱与油藏渗透率的相适性

表 2 为泡沫复合驱在不同渗透率油层(渗透率分别为  $1.20 \mu\text{m}^2$ 、 $0.70 \mu\text{m}^2$ 、 $0.30 \mu\text{m}^2$ )的实验结果。从表中可以看出,泡沫复合驱的最终采收率与油藏的渗透率有一定的对应关系,即随着渗透率的降低,最终采出程度逐渐下降(图 2)。根据泡沫阻力系数的定义(即相同流量下泡沫与盐水流经岩芯的压力降之比),通常情

况下,岩芯渗透率越大,泡沫在其中的阻力系数越大,即泡沫在高渗透岩芯中的相对封堵强度远大于在低渗透岩芯中的相对封堵强度<sup>[7~9]</sup>。从这个意义上说,渗透率较高的岩芯,必将会有较好的泡沫复合驱采收率<sup>[10,11]</sup>。关于这一现象的机理可从两个方面来分析:(1)泡沫表现在宏观视粘度上的剪切稀释效应,即在低渗透率岩芯中,孔隙及尺寸较小,驱替体系在其中的真实

表 2 渗透率对采出程度的影响统计表

Table 2 Effect of the permeability on oil recovery

项 目	水驱阶段增 加采出程度 (%)	水气交替驱 结束采出程 度(%)	主段塞阶段 增加采出程 度(%)	副段塞阶段 增加采出程 度(%)	保护段塞驱 增加采出程 度(%)	后续水驱增 加采出程度 (%)	最终 采出程度 (%)
0.30 $\mu\text{m}^2$	30.79	43.50	8.58	4.47	1.03	0.34	57.92
0.70 $\mu\text{m}^2$	31.33	43.75	7.26	4.59	2.0	1.15	58.75
1.20 $\mu\text{m}^2$	31.51	43.96	10.56	5.55	1.97	0.81	62.84

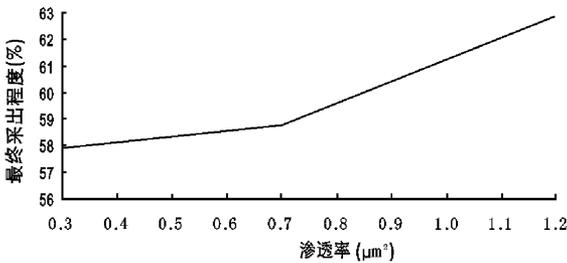


图 2 渗透率对采出程度的影响

Fig. 2 Effect of the permeability on oil recovery

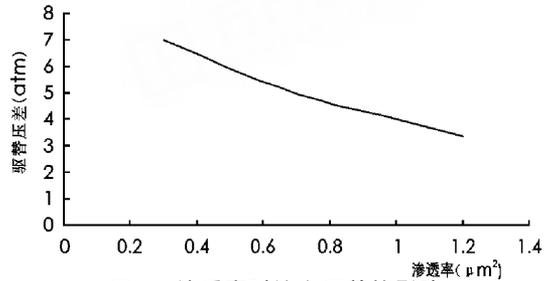


图 3 渗透率对注入压差的影响

Fig. 3 Effect of permeability on injection pressure difference

流速(或剪切速度)较大,因此所表现出的真实视粘度要比高渗透岩芯中低;(2)表现在微观上的气泡前缘突破阻力:岩芯中单个气泡表面在其运移方向上覆盖的孔隙越多,其运移时的前缘突破阻力越小。因此,在低渗透岩芯中由于气泡前缘突破阻力引起的流动阻力要比高渗透岩芯中小。

另外,进行了不同渗透率岩芯在泡沫复合驱不同驱替阶段的驱替压差变化。实验结果表明,随着泡沫复合体系的注入,压差不断上升。在泡沫复合体系段塞结束注入后,由于岩芯中滞留的泡沫仍然在起作用,所以在后续聚合物的驱替中,压差仍然保持较高的值,而在后续水驱时,岩芯中的泡沫开始消失,压差也开始明显下降。

统计较高的压差值进行平均,随着渗透率下降,注入压差逐渐上升(表 3 及图 3)。综合所有泡沫复合驱室内模拟实验结果,一般驱油效果好的岩芯,驱替过程中压差的增幅较大。同样渗透率的两个模型比较,如果驱替压差低,一般驱油效果都很差。可以说驱替压差大、注入压力高,正是泡沫复合体系成功驱替的特征之一。

2.3 气液交替周期对采出程度的影响

表 4 的结果表明:随着气液交替周期的增加,采出程度也在增加,在交替周期达到 8 次后,已经基本接近混注的情况(图 4)。

表 3 渗透率对注入压差的影响统计表

Table 3 Effect of the permeability on injection pressure difference

项目	1.20 $\mu\text{m}^2$	0.70 $\mu\text{m}^2$	0.30 $\mu\text{m}^2$
注入压差 1(atm)	3.3	4.9	7.0
注入压差 2(atm)	3.4	5.1	7.0
平均注入压差(atm)	3.35	5.0	7.0

这是因为交替周期越少,段塞越大,起泡剂在地层中的发泡越不充分,在达到一定程度后,就变成了气液交替驱油,驱替效果自然变差。只有交替周期多,注入段塞小,起泡剂才能与注入气充分接触,达到良好的发泡目的,从而更好地封堵高渗透层带,获得最佳驱油效果。

2.4 泡沫驱油对比实验研究

实验通过进行正常泡沫复合驱的驱油效果研究,并对比实验水气交替之后进行三元复合驱的情况,以便从另一个角度确定泡沫复合驱矿场试验的效果。

比较表 5 的结果可以看出,即使在渗透率较低的油藏,泡沫复合驱仍然比普通的 ASP 复合驱具有明显的优势。尽管注入总量相同,但是由于普通复合驱不可能最大限度地扩大波及体积(包括气体上浮运移的搅动及稀释作用)<sup>[5]</sup>,因此决定其最终采出程度不会高于泡沫复合驱。

表 4 气液交替周期对采出程度的影响

Table 4 The effect of period of gas alternating injection with liquid on oil recovery

项 目		气液交替周期			
		1 次	4 次	6 次	8 次
水驱阶段增加采出程度(%)	实验 1	30.7	31.28	30.55	30.86
	实验 2	31.65	30.77	31.76	31.79
水气交替驱结束采出程度(%)	实验 1	43.65	43.72	43.68	43.58
	实验 2	44.18	43.27	44.0	44.72
主段塞阶段增加采出程度(%)	实验 1	4.85	5.21	6.21	7.77
	实验 2	6.15	6.01	6.82	8.12
副段塞阶段增加采出程度(%)	实验 1	2.54	4.03	4.53	4.95
	实验 2	2.20	3.61	4.71	4.64
保护段塞驱增加采出程度(%)	实验 1	0.92	0.95	1.19	0.71
	实验 2	0.66	0.96	0.94	0.93
后续水驱增加采出程度(%)	实验 1	0.23	0.24	0.48	0.47
	实验 2	0	0.72	0.71	0.23
最终采出程度平均值(%)		52.69	54.36	56.64	57.86

表 5 驱油对比实验统计表

Table 5 Displacement contrast on the test

项 目	正常泡沫复合驱		水气交替之后 ASP 复合驱		水气交替之后 泡沫复合驱
	实验 1	实验 2	实验 1	实验 2	实验 1
主段塞气液比	1:1	1:1			1:1
副段塞气液比	1:1	1:1			1:1
水驱阶段增加采出程度(%)	38.1	39.06	30.9	30.34	31.15
水气交替驱结束采出程度(%)	No	No	43.32	43.82	44.36
主段塞阶段增加采出程度(%)	19.05	19.29	7.37	8.09	15.70
副段塞阶段增加采出程度(%)	7.62	7.29	3.46	3.37	6.66
保护段塞驱增加采出程度(%)	2.38	2.35	1.60	0.90	1.43
后续水驱增加采出程度(%)	0.95	0.47	1.15	0.45	0.95
最终采出程度(%)	68.10	68.47	56.90	56.63	69.08
平均最终采出程度(%)	68.29		56.77		69.08

### 3 建议

泡沫复合驱矿场试验表明,目前存在的主要问题只是注入工艺上的困难。有关配方的研究已经有了很深入的认识,关键是解决气体难以注入即压力快速升高的问题。泡沫复合驱的优势即是最大限度地封堵高渗透层带,最大限度地启动中、低渗透层。启动中、低渗透层自然需要更高的注入压力,同时,泡沫流体自身的性质,也使注入压力升高。较高的压力使得注入气量难以保证,气液比下降,最终的效果不理想。根据现有的研究结果,对泡沫复合驱技术的进一步发展,提出以下建议:

(1)为了保证试验效果,泡沫复合驱最好在水驱之后的油层进行,而不能像目前矿场这样,在水气交替驱后进行,一方面影响见效时间,更主要还是影响最终的驱替效果。

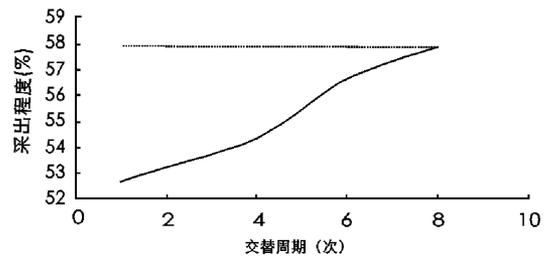


图 4 交替周期对最终采出程度的影响

Fig. 4 Diagram showing the effect of the period of gas alternate

(2)渗透率对泡沫复合驱效果的影响很明显,为了保证注入方案的顺利实施,建议尽量选择较高渗透率的油层进行试验。

(3)泡沫复合驱主、副段塞的设计可以驱替更多的残余油,但主段塞的作用更加重要,只要保证主段塞的正常注入,基本上可以保证整个试验的效果。因此,若主段塞阶段不能正常注入,副段塞阶段可免除补气等不必要的措施。

(4)处理注入井,减少注入压力在近井地带的损失,并通过采取适当的工艺措施,避免复合体系在近井地带发泡,也是保证泡沫复合驱顺利进行的有效措施。

## 4 结论

(1)对于泡沫复合驱来说,气液比是影响驱替效果的最为重要的因素,随着气液比的下降,最终采出程度是下降的,特别是设计有主、副段塞的情况下,主段塞气液比的变化是影响采出程度的主要因素。

(2)气液交替周期对泡沫复合驱的影响是非常明显的,随着交替周期的增加,其最终采出程度不断逼近气液混注条件下的最终采出程度。

(3)通过泡沫复合驱对比实验研究,仍然可以肯定,相比于普通的ASP复合驱,泡沫复合驱技术具有明显的优势。

### 参考文献:

- [1] 廖广志,李立众.常规泡沫驱油技术[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [2] 廖广志,张春雷,张文祥.大庆油田三次采油技术研究现状及发展方向[A].大庆油田博士后优秀论文集

- [C].北京:石油工业出版社,2001.
- [3] Gao S T, Li H B, Li H F. Laboratory investigation of combination of alkaline-surfactant-polymer technology for Daqing EOR[J]. SPE Reservoir Engineering, 1995, 10(3): 55-61.
- [4] 姜继水,宋吉水.提高石油采收率技术[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [5] 刘中春,侯吉瑞,岳湘安,等.泡沫复合驱微观驱油特性分析[J].石油大学学报,2003,27(1):49-53.
- [6] 杨承志,韩大匡.化学驱油理论与实践[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [7] 张思富.大庆油田非混相水气交替注入现场试验[J].提高采收率技术,1985,5(1):35-40.
- [8] Llave F M, Olsen D K. Use of mixed surfactants to generate foams for mobility control in chemical flooding[J]. SPE/DOE, 1990, 34-41.
- [9] 侯吉瑞.化学驱原理与应用[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [10] 钱昱,张思富,吴军政,等.泡沫复合驱泡沫稳定性及影响因素研究[J].大庆石油地质与开发,2001,4(2):33-35.
- [11] Holm L W. The mechanism of gas and liquid flow through porous media in the presence of foam[J]. SPEJ (Dec), 1968, 359-369.

# Simulation Evaluation of the Application Project in ASP-Foam Flooding.

YU Hui-yu<sup>1,2,3</sup>, HUANG Mei<sup>2</sup>

- (1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, GuangZhou 510640, China;  
2. No 3 Oil Production Company of Daqing Oil Field Company Ltd., Daqing 163511, China;  
3. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** During the ASP-Foam flooding pilot in Daqing oil field international first test, the gas was put into the systems of ASP(alkaline-surfactant-polymer), the restriction of injecting pressure of compressor and the injection-production process result in the difference between the application and the test project. Simulation Experiment was conducted in order to evaluate the test result exactly. It concluded: the different gas/liquid ratio was the most important factor. With the ratio went down, the oil recovery would decrease in the end. The period of gas alternate injection influenced the results of the ASP-Foam obviously. The contrast experiment of ASP-Foam flooding and normal ASP flooding was also conducted. It is suggested that displace efficiency of ASP-Foam flooding is more advantage in the simulation tests.

**Key words:** Foam flooding; Application project; Simulation evaluation

万方数据