

绥中 36-1 油田氮气泡沫逐级调驱实验研究

李文静¹ 林吉生^{2,3*} 徐国瑞⁴ 王善堂^{2,3}

(中国石化胜利油田勘探开发研究院¹;中国石化胜利油田石油工程技术研究院²;
山东省稠油开采技术省级重点实验室³,东营 257000;中海油田服务股份有限公司油田生产研究院⁴天津 300450)

摘 要 多层砂岩油藏非均质严重,大段多小层笼统注水时注入水沿高渗透层窜流;利用氮气泡沫驱可有效改善注入剖面。在前人双管实验研究的基础上,创新提出应用三管并联驱替注泡沫逐级调驱的实验方法,重点研究了不同渗透率级差、相同渗透率级差不同渗透率级别和气液比对氮气泡沫调驱效果的影响。研究结果表明经过氮气泡沫调驱后,泡沫有效发挥了调整分流作用,使高渗管、中渗管和低渗管的产液量趋于均匀,体现了“分级堵调、逐级启动”的特性,有效改善了非均质储层的开发效果,对该类油藏的高效开发有一定的借鉴意义。

关键词 非均质 氮气泡沫 三管实验 逐级调驱 驱油效率
中图分类号 TE345; **文献标志码** B

SZ36-1 油田是渤海辽东湾大型海上稠油砂岩油田,构造形态为断裂背斜,油藏类型为受构造和岩性控制的层状砂岩油藏,油藏埋深 1 300 ~ 1 500 m,储层发育、连通性好、油层分布稳定。储层为东营组下段,为高孔高渗疏松砂岩油藏。油层厚度大,含油砂层多,非均质严重,注入水沿着高渗透层窜流,冲刷时间越长,窜流越发育,导致中低渗透层不能有效动用,表现为整个油藏水驱采收率低。

通过向储层中注入氮气和泡沫剂,可在地层孔道中产生泡沫,高强度的泡沫封堵高渗透层或大孔道,可有效抑制注入水进入高渗透层,转向进入中低渗透层,提高波及面积和驱替效率^[1-4]。氮气泡沫调驱技术具备了泡沫驱扩大波及体积和表面活性剂增加洗油效率的双重特性,采用泡沫调驱技术可有效解决该矛盾^[5,6];但是对高渗层的堵调效果不是很理想。因此,研究泡沫选择性封堵的特性,解决多层堵调的问题,为渤海绥中 36-1 油田注水高效开发提供思路和指导。

本文针对氮气泡沫在不同渗透率级差适应性及气液比对驱替效率的影响开展了双管及三管并联实验研究。

1 实验研究

1.1 实验仪器及材料

模型恒温装置,控温精度 ±0.5 ℃;三管并联流

程:模型单管,长 60 cm,内径 2.54 cm,管式填充石英砂模型;气体质量流量计:控制流量 0 ~ 1 000 mL;回压阀,控压范围 0 ~ 35 MPa,控压精度 0.01 MPa;模型出口接可视观察窗及回压控制阀,自动采集数据。

模拟地层水:矿化度 9 500.54 mg/L(表 1)。泡沫剂为 FCY-L 泡沫剂,工业品,胜利油田石油工程技术研究院提供,pH7 ~ 8,密度 1.00 ~ 1.01 g/cm³,有效含量 35%。

实验油样:试验区块原油(SZ36-1C28),50 ℃黏度为 3 696 mPa·s,油品性质见表 2。

表 1 36-1 块地层水水质分析数据/(mg·L⁻¹)
Table 1 The classification of formation water
in SZ36-1/(mg·L⁻¹)

K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	总矿化度
3 444.8	142.6	90.9	547.0	138.0	5 137.2	9 500.5

表 2 油品性质
Table 2 Crude oil property

组分	饱和烃	芳香烃	胶质	沥青质
含量/%	37.52	27.77	30.1	4.21
分子量/(g·mol ⁻¹)	358	454	1 132	7 161
黏度/(mPa·s)	3 696			

1.2 实验步骤

实验步骤:①人工填砂岩心管抽真空,饱和注入水,根据岩心的吸水量,计算填砂岩心的空隙体积和孔隙度;②测量填砂岩心的水相渗透率;③选择满足渗透率及级差要求的填砂岩心饱和 SZ36-1 区块脱水原油,建立束缚水饱和度④开展地层水驱替实验,在产出液含水率达到 98% 时,结束水驱实验;⑤开展实验设定孔隙体积倍数(PV)的氮气泡沫驱后转

2015 年 11 月 23 日收到
第一作者简介:李文静(1982—),女,工程师。研究方向:油气田开发技术。E-mail:abcliwj@sina.com。
* 通信作者简介:林吉生。E-mail:phoenixe@139.com。

水驱,至产出液含水率达到 98% 后,结束实验;⑥记录计算各个阶段的压力、产出液含水率、阻力因子、采出程度、分液率等参数。

1.3 实验条件

温度:65 ℃;回压:2 MPa;注入气体为氮气:纯度 99%;模拟地层水配制泡沫剂溶液,泡沫剂质量浓度 0.5%;气液比分别为 1:1。

2 实验结果与分析

2.1 渗透率级差对氮气泡沫驱油效果影响

2.1.1 双管驱替实验

不同渗透率级差条件下,水驱后氮气泡沫驱油效果对比见表 3。

实验结果表明,随着渗透率级差的增大水驱采出程度逐渐减小,氮气泡沫驱对采出程度的改善先增大后减小,结果表明氮气泡沫驱在一定的渗透率级差范围内(<8.18)能够有效改善采出程度;渗透率级差过大采出程度变差,主要是由于低渗透管的启动压力大于泡沫在高渗透管中产生的封堵压力,无法有效改善低渗透管的采出程度。

表 3 水驱后氮气泡沫驱油效果对比表

Table 3 Effect comparison of nitrogen foam flooding after water flooding

序号	渗透率级差	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$		水驱采出 程度/%	泡沫驱采 出程度/%	采出程度 提高值/%
		高	低			
1	2.36	4 820	2 040	29.05	52.26	23.21
2	5.05	9 850	1 950	26.17	51.83	25.66
3	8.18	10 600	1 295	23.65	41.27	17.62
4	11.67	12 320	1 056	21.32	30.13	8.81

2.1.2 三管驱替实验

通过双管驱替实验结果知道,渗透率级差大于 11.67,氮气泡沫改善非均质采出程度效果显著降低,然而绥中 36-1 油田测井相资料证实,每个油组内油层为反韵律粒级特点,在横向表现出稳定、连续分布的特征^[7],虽然整体渗透了级差达到 20 左右,但储层是逐渐变化的,因此,本次研究采用三管模型研究渗透率级差对氮气泡沫驱油效果影响。

模型基本参数见表 4 所示。

表 4 岩心基本参数(10000-2000-500 组合)

Table 4 Core basic parameters

岩心	饱和水 /mL	饱和油 /mL	孔隙度 /%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	含油 饱和度/%	渗透率 级差
高渗	94.1	82.9	36.9	9 640	88.1	18.9
中渗	91.0	85.5	35.7	1 960	94.0	/4.9
低渗	90.0	80.7	35.3	510	89.7	/3.8

实验过程中模型驱替效率、含水率与注入过程

压差动态变化与注入 PV 数关系曲线见图 1 所示。

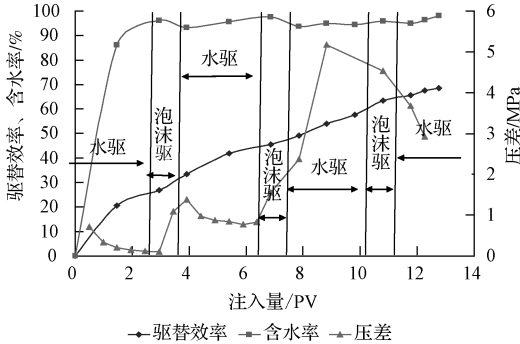


图 1 驱替效率、含水率和驱替压差曲线

Fig. 1 Displacement efficiency, water cut and displacement pressure difference curve

从图 1 可知:

(1) 水驱至含水为 98% 时,模型驱替效率为 26.77%,非均质性影响了水驱效果。

(2) 注入 1 PV 泡沫+3 PV 水驱+1 PV 泡沫+3 PV 水驱+1 PV 泡沫+后续水驱过程中,水驱的驱替压差不断下降,注入泡沫段塞后,压力逐级上升,由第一个泡沫段塞的 1.38 MPa 上升至第三个泡沫段塞的 5.37 MPa,呈现泡沫逐步累加效应。

从非均质单管来进行对比,单管驱替效率、含水率和分液率与注入 PV 数关系曲线分别见图 2、图 3 和图 4 所示。

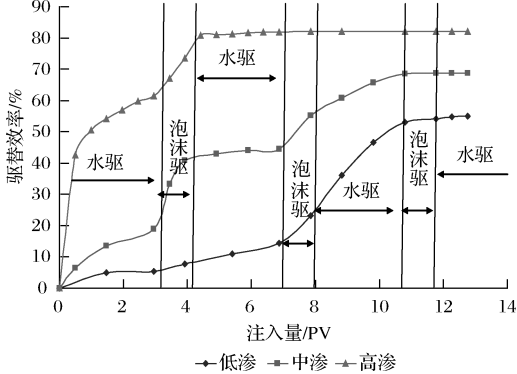


图 2 驱替效率曲线

Fig. 2 Displacement efficiency curve

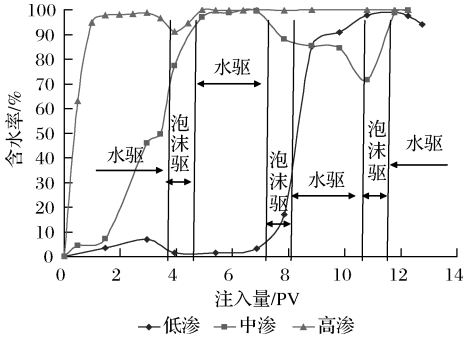


图 3 含水率曲线

Fig. 3 Water cut curve

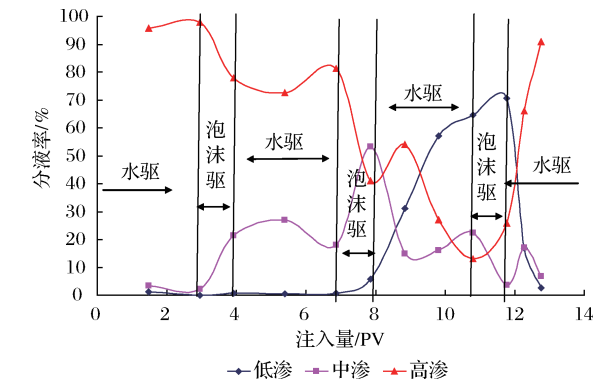


图4 分液率曲线
Fig.4 Liquid separation rate curve

水驱至含水 98% 时,高渗管驱替效率为 61.39%,而中、低渗管驱替效率低,动用效果差,驱替效率分别为 19.61% 和 6.23%。

注入泡沫段塞过程中,泡沫优先进入高渗管,提高该管驱替效率并逐渐产生封堵,中、低渗管开始动用,驱替效率开始上升。最终高、中和低渗管驱替效率分别达到 82.00%、68.70% 和 54.97%。

从驱替过程中含水率的变化能够知道:高渗透管含水率大于 90%,第一个调驱段塞,泡沫剂主要进入高渗管并产生有效封堵,含水率出现一个下降漏斗(含水率从 98.9% 降至 89.2%),中渗管含水率开始上升至含水率大于 98%;开始第二个调驱段塞,泡沫剂主要进入中渗管并产生有效封堵,含水率出现大幅下降漏斗(含水率从 98.3% 最低降低至 68.5%);此时,低渗管得到有效动用,最终含水率也达到 98% 以上。

从分液率曲线可看出,水驱过程中 95% 以上的注入水进入了高渗管,中、低渗管基本没有得到动用;在注入第一个氮气泡沫段塞后,高渗管产液下降,中渗管开始得到动用;注入第二个氮气泡沫段塞,封堵了中渗管,低渗管得到了动用;当驱替到 12 PV 氮气泡沫封堵效果失效,高渗管又变为主要吸水层。

三管模型经过氮气泡沫逐级调驱后,泡沫逐级有效的发挥了调整分流作用,使高渗管、中渗管和低渗管的产液量趋于均匀,说明氮气泡沫能够有效改善非均质储层的开发效果。

2.1.3 相同渗透率级差不同渗透率的三管驱替实验

填制相同渗透率级差但渗透率不同(同等缩小)的高、中、低渗的岩心管,开展三管并联的驱替实验研究模型基本参数见表 5 所示。

表 5 岩心基本参数(2000-500-100 组合)

Table 5 Core basic parameters

岩心	饱和水 /mL	饱和油 /mL	孔隙度 /%	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	含油 饱和度/%	渗透率 级差
高渗	88.6	79.4	34.8	2 040	89.6	18.9
中渗	83.5	73.2	32.8	530	87.7	/4.9
低渗	80.1	73.4	31.4	108	91.7	/3.8

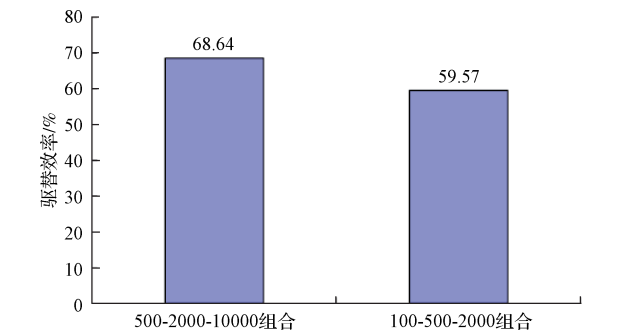


图5 相同渗透率级差不同渗透率组合驱替效率对比
Fig.5 The same permeability of different permeability combination displacement efficiency comparison

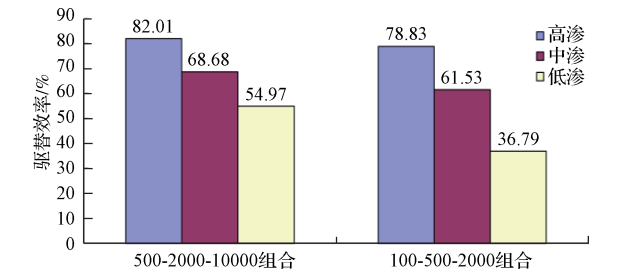


图6 相同渗透率级差不同渗透率岩心管驱替效率对比
Fig.6 The same permeability cores of different permeability tube displacement efficiency comparison

从图 5、图 6 可知,渗透率级差相同,渗透率更高 的 500-2000-10000 组合驱替效率明显大于渗透率低的 100-500-2000 组合,说明氮气泡沫更适合封堵高渗透层,主要原因是泡沫流体的剪切变稀性,在低渗透层中,孔隙尺寸较小,泡沫在其中的渗流流速更大,视黏度降低,封堵效果变差。

2.2 气液比对氮气泡沫驱油效果影响

气液比是氮气泡沫调驱技术的重要参数,气液比过大,容易气窜,降低效果;气液比小,泡沫剂不能有效发泡,调剖能力降低。本次研究选择气液比分别为 1:2、1:1、2:1、3:1,实验方案为水驱至含水 98% + 3 PV 泡沫(四套气液比方案) + 后续水驱。

(1)从最终驱替效率比较,方案二(气液比 1:1)驱替效率最高,方案一(气液比 1:2)和方案三(气液比 2:1)次之,方案四(气液比 3:1)效果最差(图 7)。

(2)从不同渗透率层驱替效率来看,方案二中、

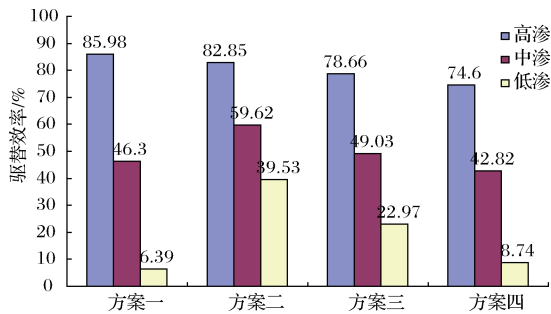


图 7 不同渗透率层驱替效率对比

Fig. 7 Comparison of displacement efficiency of different permeability layers

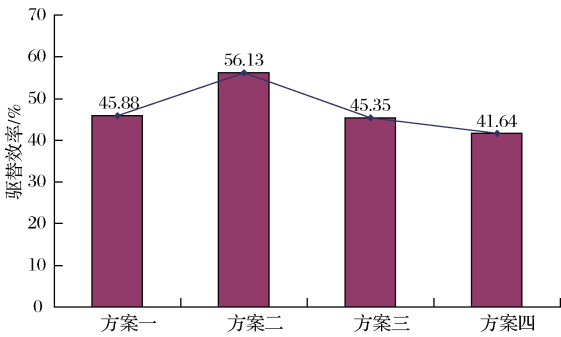


图 8 不同方案驱替效率对比

Fig. 8 Comparison of displacement efficiency of different schemes

低渗透率层动用程度最大,驱替效率高;从方案一、方案三、方案四来看,泡沫堵调效果都不明显,对低渗透层启动差;但是从高渗层驱替效率来看,泡沫剂的液量注入越多,高渗层驱替效率越高(图8)。

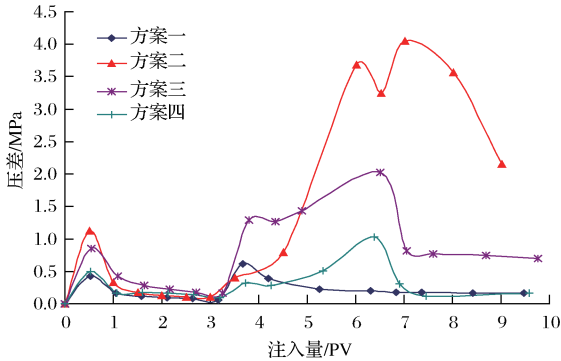


图 9 不同方案注入过程压力特征对比

Fig. 9 Comparison of pressure characteristics of different scheme injection process

从图9可以看出,气液比为1:1的方案(方案二)封堵压差高,效果明显;注入泡沫初期,气液比越高,压力上升快,但是封堵能力较差,进行后续水驱压力下降更加明显。

综上所述,气液比对泡沫调驱增产效果存在较大影响,尤其对于动用中低渗透层气液比1:1具有

明显优势;而相对气液比3:1动用中低渗透层能力显著变差,且在驱动过程中,出现了明显的气窜现象(一股气一股液),调控气液比是控制气窜的重要方式。

3 结论

(1)多层段笼统注水,驱替效率低,高渗层水窜严重,而中、低渗透率未得到有效动用。

(2)注入氮气泡沫段塞,封堵了高渗层,减小了油层渗透率差异,使高渗管、中渗管和低渗管的产液量趋于均匀,有效的发挥了泡沫的调整分流作用,改善了水驱波及,体现了“分级堵调、逐级启动”的特性。

(3)气液比过低或过高,均不能形成稳定的封堵调剖,室内实验结果为气液比1:1效果最好。

参 考 文 献

- 1 李爱芬,唐健健,陈 凯,等. 泡沫在不同渗透率级差填砂管中的调驱特性研究. 岩性油气藏,2013;25(4):119—122,128
Li Aifen,Tang Jianjian,Chen Kai, *et al.* Characteristics of foam driving and profile controlling in heterogeneous sand pack tube. Lithologic Reservoirs, 2013;25(4):119—122,128
- 2 彭昱强,徐绍诚,莫成孝,等. 渤海稠油田氮气泡沫调驱室内实验研究. 中国海上油气,2008;20(5):308—311
Peng Yuqiang Xu Shaocheng Mo Chengxiao *et al.* A laboratory research on nitrogen foam adjustment of oil displacement in Bohai heavy oilfields. China Offshore Oil and Gas,2008;20(5):308—311
- 3 Bhide V Hirasaki G Miller C, *et al.* Foams for controlling water production R,SPE 93273,2005:2—5
- 4 刘 合,叶 鹏,刘 岩,等. 注氮气泡沫控制水窜技术在油田高含水期的应用. 石油学报,2010;31(1):91—95
Liu He, Ye Peng, Liu Yan, *et al.* Nitrogen foam injection technique and its application in reservoirs with high water cut. Acta Petrolei Sinica, 2010;31(1):91—95
- 5 李 翔,侯永利,张云宝,等. 渤海油田泡沫调驱用起泡剂静态性能评价及筛选. 重庆科技学院学报(自然科学版),2011;13(6):30—33
Li Xiang,Hou Yongli,Zhang Yunbao, *et al.* Research on the selection and static performance evaluation of foam agents for foam flooding application in Bohai Oilfields. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011;13(6):30—33
- 6 Zheng Q, Liu H, Li F, *et al.* Quantitative identification of steam breakthrough channel after steam flooding in heavy oil reservoirs. SPE156989, 2012:1—6
- 7 王营营. SZ36_1 油田水驱开发效果评价研究. 成都:西南石油大学,2013
Wang Yingying. Research on water flooding development effect evaluation in SZ36_1 Oilfield. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013

A Laboratory Research on Nitrogen Foam Flooding Step
by Step in SZ36-1 Oilfield

LI Wen-jing¹, LIN Ji-sheng^{2,3*}, XU Guo-rui⁴, WANG Shan-tang^{2,3}

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield Company Limited¹; Research Institute
of Petroleum Engineering, Shengli Oilfield Company Limited², SINOPEC; Shandong Key Laboratory of Heavy Oil Recovery Technique³,
Dongying 257000, P. R. China; Oilfield Production Research Institute, China Oilfield Service Limited⁴, Tianjin 300450, P. R. China)

[Abstract] The heterogeneity of multi layer sandstone reservoir heterogeneity is serious, Large section and small layer general water injection water along the high permeability layer, Using nitrogen foam flooding can effectively improve the injection profile. Based on the previous experimental research on double tube, a new experimental method for the application of the three tube parallel displacement injection foam step by step, Focus on the effect of different permeability difference, the same permeability difference of different permeability level and gas-liquid ratio on nitrogen foam profile displacement. The results show that the foam can effectively play a role in regulating the flow of the fluid after nitrogen foam, so that the production of high permeability, medium and low permeability is uniform, which reflects the characteristics of “grading and plugging, step by step”. It has some reference value for the development of this kind of reservoir.

[Key words] heterogeneous nitrogen foam three tube displacement experiment sequential control
and flooding oil displacement efficiency

(上接第 159 页)

Study on Forming Conditions and Characteristic Parameter
of Yan’er Gully debris Flow in Gansu Province

ZHANG Xue-yan¹, JIA Lei^{2*}; WANG Wei-zao²

(Institute of Natural Disaster Prevention and Control, Gansu Academy of Sciences¹, Lanzhou 730000, P. R. China;
School of Exploration Technology and Engineering, Shijiazhuang University of Economics², Shijiazhuang 050031, P. R. China)

[Abstract] After the “5. 12” earthquake, geological environment in Longnan mountainous area of Gansu province has deteriorated sharply. Frequent landslides, rockfall, landslide and ground fissures, resulting in more broken Yan’er gully mountain. This provides an adequate source of material for the debris flow. Under heavy rainfall conditions, the formation of debris flow, a serious threat to the production and life of the disaster area. Based on the field investigation, formation conditions of Yan’er gully debris flow are analyzed. The kinematic and dynamic parameters of debris flow are analyzed and calculated. Reference Yan’er gully debris flow formation characteristics, giving suggestion on mainly making the channel bed stability, management of the debris flow; main channel and branch gullies with governance recommendations. It also provides reference for the similar projects.

[Key words] Yan’er gully debris flow formation conditions prevention measures
characteristic parameter