

文章编号:1673-5005(2012)03-0126-04

泡沫体系多流态渗流特征试验

郭兰磊

(中国石化胜利油田分公司地质科学研究院,山东东营 257015)

摘要:为研究低张力泡沫体系多流态渗流特征,采用泡沫驱替试验分析泡沫渗流的瞬态和稳态变化特点,泡沫体系流动过程中的高、低干度流态区特征以及两种流态的转化条件。结果表明:泡沫在岩心内是逐渐形成的,当泡沫达到稳态后呈活塞式驱替;泡沫渗流具有多流态特征,在高干度流态区,压力梯度随液相速度增加而增加,压力梯度的对数值与液相速度呈较好的线性关系,而与气相速度关系不大;在低干度流态区,压力梯度随气相速度增加而增加,压力梯度的对数值与气相速度呈一定的线性关系,而与液相速度关系不大。

关键词:泡沫体系;高干度流态;低干度流态;渗流特征;物理模拟

中图分类号:TE 357.46 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.021

Experiment on multiple flow regime characteristics of foam system

GUO Lan-lei

(Geological Science Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257015, China)

Abstract: In order to investigate the multiple flow regime characteristics of the foam system with a low tension, the flow characteristics of the transient and steady state of the foam system were analyzed by using foam flooding experiments. The characteristics in flow regimes with high and low quality respectively were observed during the process of foam flooding. The conditions for transforming from one flow regime to the other flow regime were also obtained. The experimental results show that the foam generates gradually in the core, and the piston-like displacement process appears when the foam system reaches steady state. Foam flooding has multiple flow regimes characteristics. In the high-quality flow regime, the pressure gradient increases with the liquid flow rate increasing. The logarithm of the pressure gradient has a good linear correlation with the liquid flow rate, while it has little relation with the gas flow rate. However, in the low-quality flow regime, the pressure gradient increases with the gas flow rate increasing. The logarithm of the pressure gradient has a linear correlation with the gas flow rate, while it has little relation with the liquid flow rate.

Key words: foam system; high-quality flow regime; low-quality flow regime; seepage characteristics; physical simulation

由于泡沫所具有的独特性质,泡沫驱油技术能够大幅度提高原油采收率,因而逐渐发展成为一种应用于高含水油田的有效三次采油技术^[1-5]。然而,泡沫体系在多孔介质中的渗流机制十分复杂,准确地认识和描述其渗流特征有助于提高泡沫驱油技术的矿场适应性。关于泡沫体系在多孔介质中流态方面的研究,Osterloh 和 Jante^[6]通过试验首次提出了泡沫的流动包括高干度和低干度两种流态,并以气体流动分数,即泡沫体系中气体流速与总流速的比值界定两种流态的转化条件。不同流态下泡沫

体系渗流特征不同,流动表征模型也有所不同。低界面张力驱油用泡沫剂兼具可形成超低界面张力和高发泡能力的优势,有较好的应用前景^[7]。笔者以低张力泡沫体系为例,开展泡沫多流态渗流特征研究,在讨论泡沫体系封堵压力与气/液渗流速度关系的基础上,研究泡沫体系流动的高、低干度流态区特征以及两种流态的转化条件。

1 试验方法

试验采用的是美国 TEMECO 公司生产的泡沫

收稿日期:2011-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(10972237;11102236);国家科技重大专项课题(2011ZX05011)

作者简介:郭兰磊(1969-),男(汉族),山东招远人,高级工程师,博士,从事三次采油方面的研究。

驱替试验系统(图1)。该系统控温精度为±0.5℃、气体质量流量控制器的控制流量为0~30 mL、回压阀控压为0~10 MPa、回压阀的控压精度为0.01 MPa、数字压力表的精度为0.01 MPa。

模拟用水为自来水;泡沫剂为低张力泡沫剂LD-1, pH值为7~8, 密度为1.00~1.01 g/cm³, 有效含量为36%;注入气体为氮气, 纯度为99.9%。物理模型为填砂管, 管长为30 cm, 内径为2.5 cm。岩心入口端、距岩心入口端10 cm、20 cm处以及出口端共有4个测压点, 依次为测压点1、2、3、4。可以记录不同时间、不同位置处岩心压力变化。通过回压阀调整岩心出口端压力, 试验温度为60℃。



图1 泡沫体系多流态渗流特征试验系统
Fig.1 Experimental system for multiple flow regime characteristics of foam system

泡沫多流态渗流特征试验设计重点是气、液流体的注入速度。基于泡沫体系高、低干度两种流态过渡区的气体流动分数 f_g^* 在0.9附近的认识^[8], 设计了10组试验, 各试验的气、液流体注入速度及渗流速度见表1。具体试验步骤如下:

表1 泡沫多流态特征试验参数

Table 1 Experimental parameters of multiple flow regime characteristics of foam system

试验序号	渗透率 $k/\mu\text{m}^2$	注入速度 $v_i/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$		渗流速度 $v/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$		气液比
		总速度	液体	液体	气体	
1	0.994	0.17	0.01	0.16	0.029	0.469 16 : 1
2	1.019	0.32	0.01	0.31	0.029	0.909 31 : 1
3	0.994	0.23	0.02	0.21	0.059	0.616 21 : 2
4	0.998	0.33	0.02	0.31	0.059	0.909 31 : 2
5	1.011	0.08	0.03	0.05	0.088	0.147 5 : 3
6	0.993	0.13	0.03	0.10	0.088	0.293 10 : 3
7	1.002	0.34	0.03	0.31	0.088	0.909 31 : 3
8	0.994	0.10	0.05	0.05	0.147	0.147 1 : 1
9	1.020	0.15	0.05	0.10	0.147	0.293 2 : 1
10	0.999	0.21	0.05	0.16	0.147	0.469 16 : 5

注:表中注入速度均为试验条件下的数值。

(1)将岩心驱替试验系统连接、安装、调试,如

图2所示。将人工敲制的石英砂模型接入系统,饱和水并除尽岩心内的空气,然后用质量分数为1%的表面活性剂溶液驱替岩心。

(2)调节回压阀压力至5 MPa,然后同时注入表面活性剂溶液和氮气,根据表1调节气、液流体注入速度,记录岩心两端和各测压点压力。

(3)当岩心各测压点压力稳定后,关闭注入泵,释放回压。

(4)更换石英砂模型,重复步骤(1)~(3)。

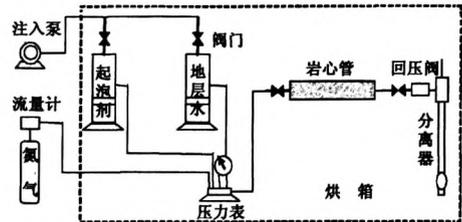


图2 泡沫体系多流态渗流试验流程
Fig.2 Experimental procedures of multiple flow regime characteristics of foam system

2 泡沫渗流瞬态变化特征

泡沫在瞬态与稳态下的渗流特征不同。所谓瞬态渗流,就是泡沫在岩心内逐渐生成的过程,其生成速度大于破灭速度,岩心各测压点压力随着注入倍数的增加而逐渐上升。泡沫体系流动过程中,泡沫由瞬态逐渐过渡到稳态。

2.1 压力变化特征

不同注入速度下,压力随注入量变化规律类似。以试验7(液体渗流速度 $v_w=0.088 \text{ m/d}$,气体渗流速度 $v_g=0.909 \text{ m/d}$)为例进行试验数据分析,图3为该试验中岩心各测压点压力与注入量的关系曲线。

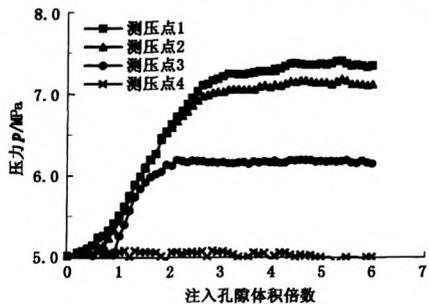


图3 岩心各测压点压力随注入体积变化
Fig.3 Variation of pressure with injection volume at different measurement points of core

从图3中可以看出,当起泡剂与氮气同时注入

后,岩心入口压力(测压点1)迅速上升,说明泡沫生成速度较快,且稳定性较好;当注入量大于 $3.0V_p$ (V_p 为孔隙体积)后,各测点压力基本保持不变,岩心中泡沫体系达到稳态。

2.2 压力梯度变化特征

图4为不同注入体积下岩心不同位置处的压差分布(图4中无因次距离 x_D 为距岩心入口段的长度 x 与岩心总长度 L 之比)。可以看出:

(1) 随着注入孔隙体积倍数的增加,岩心不同位置处压差逐渐上升,当注入体积等于 $3.0V_p$ 时,岩心压差基本不变,此时泡沫在岩心内达到稳态。

(2) 相对于岩心后段(B段和C段),岩心入口端(A段)压力梯度较小,说明泡沫在岩心内是逐渐形成的,入口端泡沫数目较少,阻力系数较小。

(3) 泡沫在岩心内达到稳态后,岩心后段(B段和C段)压力梯度相等,泡沫在岩心内呈活塞式驱替。

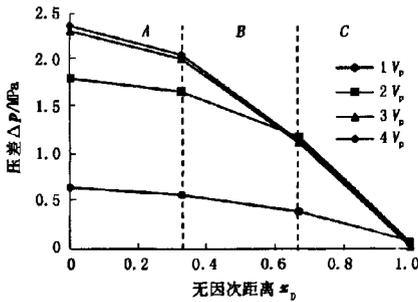


图4 岩心各测压点压差分布
Fig.4 Distribution of pressure difference at different measurement points of core

3 泡沫渗流稳态变化特征

泡沫稳态渗流是指泡沫在岩心内渗流时稳定存在,其生成速度等于破灭速度,此时岩心各测压点压力保持不变。

图5为不同试验条件下泡沫达到稳态时测试的压力梯度分布及通过插值绘制的压力梯度等值线。图5中圆点附近标示的数值为该试验点测得的岩心两端压力稳定后的压力梯度值,单位为兆帕每米。可以看出,考虑气液流速比的不同,根据低张力泡沫驱压力梯度分布可以划分为两种流态,左侧区域气液比较高,泡沫干度较高,为高干度流态区。在该区压力梯度仅与液相流速有关,液相流速越大,压力梯度越大,与气相流速关系不大。图5中右侧区域气液比较低,泡沫干度相对较低,为低干度流态区。在

该区压力梯度仅与气相流速有关,气相流速越大,压力梯度越大,与液相流速关系不大。高、低干度流态区以临界泡沫干度 $f_g^* = 0.84$ 为界。

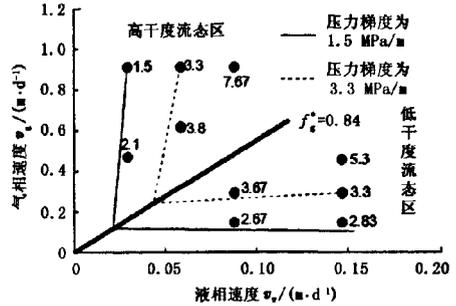


图5 压力梯度等值线分布
Fig.5 Distribution map of contour lines of pressure gradient

选取 $v_g = 0.911$ m/d 时的数据点,绘制高干度流态区压力梯度随液相速度变化曲线,同时选取 $v_w = 0.147$ m/d 时的数据点,绘制低干度流态区压力梯度随气相速度变化曲线(图6)。可以看出,在高干度流态区,压力梯度的对数值与液相流速呈较好的线性关系,而在低干度流态区,压力梯度的对数值与气相流速呈一定的线性关系。

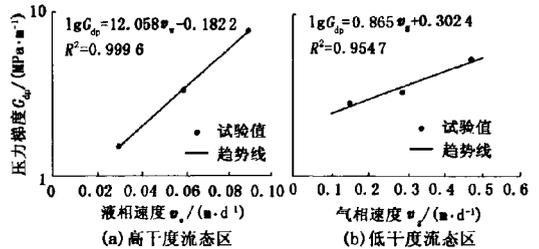


图6 压力梯度随液相、气相速度变化曲线
Fig.6 Variation of pressure gradient with liquid and gas flow rate

国外学者在研究泡沫驱渗流时同样发现了这一现象^[9-10], Osterloh 和 Jante^[6] 提出了泡沫驱渗流的多流态特征,他们通过试验得到压降等值线,发现当气体流动分数 f_g^* 大于 0.94 时,存在一个高干度流态,在这种状态下压降与气相流速无关,但是与液相流速的 0.33 次方成比例;当气体流动分数 f_g^* 小于 0.94 时,存在一个低干度流态,在这种状态下压降与液相流速无关,但是与气相流速的 0.31 次方成比例。

在高干度流态区,泡沫的存在符合临界毛细力模型,压差主要取决于泡沫稳定性能;而在低干度流态区,气泡尺寸均匀,泡沫尺寸较小且较稳定,压差主要取决于多孔介质的性质。高、低干度两种流态过渡区

对应的临界泡沫干度 f_g^* 值的影响因素较多,主要包括表面活性剂性质和浓度、岩石渗透率等参数。

Chalbaud 等^[8]通过试验验证了泡沫驱高低干度流态分布情况,其试验条件与本文试验接近。所用岩心为贝雷砂岩,岩心长度为 30.48 cm,内径为 3.81 cm,孔隙度为 23%,渗透率为 $0.215 \mu\text{m}^2$ 。泡沫剂类型为 AOS,质量分数为 1%,试验温度为 90 °C,回压设置为 5.5 MPa。压力梯度对比如图 7 所示。图 7 中等值线为文献数据,圆点数值为本次研究在相应条件下的压力梯度值,单位为兆帕每米。可以看出,在相同渗流速度条件下,本试验压力梯度比文献中的试验值稍低,但文献中岩心渗透率 $0.215 \mu\text{m}^2$ 低于本试验的 $1.0 \mu\text{m}^2$,反映出试验所采用的起泡剂性能与文献中所用起泡剂相近。从压力梯度分布来看,高低干度区压力梯度随气、液速度变化规律类似,而文献中高低干度区分界点泡沫干度 $f_g^* = 0.9$ 高于本试验的 0.84。

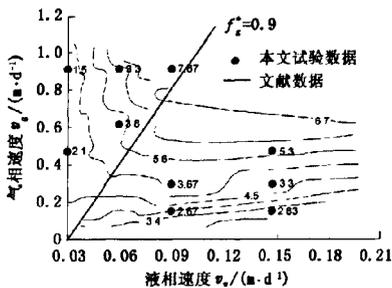


图 7 多流态特征试验结果对比

Fig. 7 Comparison of experimental results of multiple flow regime characteristics

4 结论

(1) 试验验证了低张力泡沫体系渗流具有的多流态特征。根据泡沫干度的不同,该体系渗流可划分为高干度流态区和低干度流态区,两流态区以泡沫干度 $f_g^* = 0.84$ 为界。

(2) 泡沫在岩心内是逐渐形成的,入口端泡沫数目较少,阻力系数较低。当泡沫在岩心内达到稳态后呈活塞式驱替。

(3) 在高干度流态区,压力梯度随液相速度增加而增加,而与气相速度关系不大;在低干度流态区,压力梯度随气相速度增加而增加,而与液相速度关系不大。

参考文献:

[1] 王增林. 强化泡沫驱提高原油采收率技术[M]. 北京:

中国科学技术出版社, 2007.

- [2] 张思富, 廖广志, 张彦庆, 等. 大庆油田泡沫复合驱油先导性矿场试验[J]. 石油学报, 2001, 22(1): 49-53. ZHANG Si-fu, LIAO Guang-zhi, ZHANG Yan-qing, et al. ASP-foam pilot test of Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 49-53.
- [3] 周国华, 宋新旺, 王其伟, 等. 泡沫复合驱在胜利油田的应用[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 369-373. ZHOU Guo-hua, SONG Xin-wang, WANG Qi-wei, et al. Application of foam combination flooding in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 369-373.
- [4] 李宾飞, 李兆敏, 刘祖鹏, 等. 多相泡沫体系调驱试验[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(4): 93-98. LI Bin-fei, LI Zhao-min, LIU Zu-peng, et al. Experiment on profile control and flooding by multiphase foam system [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(4): 93-98.
- [5] 尤源, 岳湘安, 韩树柏, 等. 油藏多孔介质中泡沫体系的阻力特性评价及应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5): 94-99. YOU Yuan, YUE Xiang-an, HAN Shu-bai, et al. Evaluation and application of resistance characteristics of foam system in reservoir porous media [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(5): 94-99.
- [6] OSTERLOH W T, Jr JANTE M J. Effects of gas and liquid velocity on steady-state foam flow at high temperature [R]. SPE 24179, 1992.
- [7] 赵长久, 麻翠杰, 杨振宇, 等. 超低界面张力泡沫体系驱先导性矿场试验研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 127-130. ZHAO Chang-jiu, MA Cui-jie, YANG Zhen-yu, et al. Pilots of ultra-low interfacial tension foam flooding [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 127-130.
- [8] CHALBAUD C A, MORENO R A, ALVAREZ J M. Simulating foam process for a Venezuelan pilot test [R]. SPE 77699, 2002.
- [9] GAUGLITZ P A, FRIEDMANN F, KAM S I, et al. Foam generation in homogeneous porous media [J]. Chem Eng Sci, 2002, 57(19): 4037-4052.
- [10] KAM S I, ROSSEN W R. A model for foam generation in homogeneous media [R]. SPE 77689, 2002.

(编辑 李志芬)