

# 低渗透油藏水驱转空气泡沫驱 提高采收率物理模拟实验

付美龙, 黄俊

(长江大学石油工程学院, 湖北武汉 430100)

**摘要:**为进一步提高镇泾油田低渗透油藏原油采收率,利用室内驱油物理模拟技术,开展了水驱转空气泡沫驱提高采收率实验研究,探讨了空气泡沫驱对低渗透油藏水驱开发效果的影响。实验结果表明,在模拟地层条件下,初始水驱阶段的平均采收率为29.06%,水驱转空气泡沫驱后,采收率得到明显提高,增量均在10%以上;再次水驱后,最终采收率平均可达到45.42%。随着空气泡沫注入速度的增加,采收率呈上升趋势,但增幅逐渐减小。注入速度越大,气体突破时间越早,不过实验过程中并未发生明显的因气窜而导致采收率降低的现象;在相同条件下,空气泡沫注入总量为1倍孔隙体积时的采收率比0.6倍孔隙体积时的高5%。研究认为,通过交替注入起泡剂溶液与空气实现空气泡沫驱对于注水开发的低渗透油藏进一步提高原油采收率是可行的。

**关键词:**低渗透油藏 空气泡沫驱 物理模拟 气窜 采收率 镇泾油田

**中图分类号:**TE357

**文献标识码:**A

**文章编号:**10096-9603(2014)05-0104-03

向油藏注气能够快速补充油藏能量,提高原油采收率<sup>[1-2]</sup>。气体泡沫驱则发挥了泡沫调剖与气体驱油的双重作用,能够提高波及系数与驱油效率,尤其适用于低渗透、存在裂缝或大孔道的油藏,是一种行之有效的提高采收率技术<sup>[3-5]</sup>。作为泡沫驱气体注入介质的空气,成本低廉且不受气源限制,是一种较为理想的驱油剂<sup>[6-8]</sup>。中国已开展过低渗透油藏空气、空气泡沫驱技术的可行性研究<sup>[9-10]</sup>,在延长和鄯善等油田的低渗透油藏进行的空气泡沫驱现场试验也表明,空气泡沫驱能明显减缓气窜,提高原油采收率<sup>[11]</sup>。

镇泾油田某区块为典型的低孔、低渗透油藏,储层为裂缝—孔隙双重介质,原始地层压力为20.2 MPa,储层平均温度为80℃,平均有效渗透率为 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均孔隙度为10.8%。该区块以注水开发为主,目前存在注水开发压力高,注入水沿大孔道或裂缝局部锥进等问题,水驱开发效果差,亟需寻求提高原油采收率的有效途径。镇泾油田原油氧化特性研究成果表明,研究区块原油氧化性能较好,具备开展空气泡沫驱的基本条件<sup>[12]</sup>。在注水开发的基础上,探索适宜的空气泡沫驱技术,有助

于实现该油田低渗透油藏以及其他油田同类型油藏的高效开发。

## 1 实验准备及方法

### 1.1 实验材料与设备

实验中长岩心模型A是利用天然岩心按调和平均方式排列而得,其平均渗透率为 $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙体积为27.99 cm<sup>3</sup>,基础数据见表1。实验设备由注入系统、岩心夹持器系统、采出计量系统等组成。

表1 长岩心模型A基础数据

岩心编号	长度/cm	直径/cm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	5.16	2.51	0.269
2	5.49	2.51	0.273
3	5.17	2.51	0.281
4	5.44	2.51	0.374
5	5.07	2.51	0.385
6	5.61	2.51	0.550
7	4.75	2.51	0.638
8	5.81	2.51	0.824
9	4.69	2.51	1.609

收稿日期:2014-06-20。

作者简介:付美龙,男,教授,博士,从事油田化学和提高采收率方面的教学与研究。联系电话:13607210109,E-mail:fm1990@tom.com。  
基金项目:中国石油化工股份有限公司华北分公司科技项目“镇泾低渗油田注气驱室内实验研究”(G13KJ-11-ZS-QT-ZJ-0013)。

实验流体包括镇泾油田某井组脱气原油,在地面和地层条件下,原油密度分别为0.82和0.79 g/cm<sup>3</sup>,原油粘度分别为6.4和3.2 mPa·s;模拟地层水,矿化度为79 622.72 mg/L,水型为氯化钙型;室内采集空气;起泡剂FT-1主要是由两性表面活性剂(十二烷基甜菜碱BS-12等)、稳泡剂(十二烷基二甲基氧化胺OA-12)及助剂(乙烯吡咯烷酮PVP、HPAM)按一定比例复配而成,其质量分数为0.25%。

### 1.2 实验步骤

实验步骤包括:①将天然岩心洗油后烘干测气测渗透率,抽空并饱和模拟地层水待用;②将原油、模拟地层水、用模拟地层水稀释的起泡剂FT-1、压缩空气装入样品桶,岩心按序装入长岩心夹持器,升温至80℃,饱和原油建立束缚水;③将ISCO高压柱塞泵设置为恒速驱替模式,设置环压电动泵压力为35 MPa,同时开启岩心夹持器入口端和出口端阀门;④先采用模拟地层水驱替,当水驱至含水率达98%时,交替注入体积比为1:1的起泡剂溶液与空气,最后再转水驱至含水率为98%,测试不同注入条件下对应的采收率,并记录实验数据。

受岩心数目及渗透率的限制,实验采用了同一组岩心,每组实验结束后将岩心处理重新饱和油水样,继续开展下一组实验。

## 2 实验结果分析

### 2.1 注入速度对采收率的影响

首先开展了3组不同注入速度下的采收率对比研究。在注入速度分别为0.01,0.02和0.05 mL/min的条件下,由注入孔隙体积倍数与采收率的关系(图1)可知,初始水驱阶段采收率增速较快;转空气泡沫驱后,采收率增速较为平缓,与水驱相比,采收率分别提高了13.32%,13.09%和11.37%,表明空气泡沫驱对单纯水驱后提高原油采收率起到了良好的效果;在后续水驱阶段,采收率再次增加,最终采

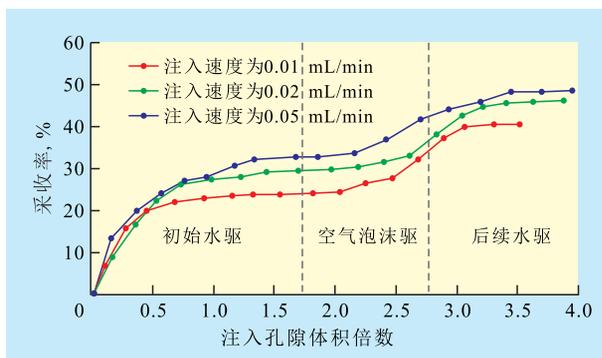


图1 驱替介质注入孔隙体积倍数与采收率的关系

收率分别为40.73%,46.60%和48.94%。分析认为,由于油水粘度比相对较低,注入水的波及范围和冲刷能力随注入速度的增加而加强,因此,单纯水驱时的采收率随注入速度的增加而大幅增大;而油气粘度比相对较大,当注空气泡沫的速度加快时,注入的空气沿水驱通道孔隙突进,因此,采收率的增幅与水驱相比略有降低。但从实验结果来看,最终采收率还是随驱替流体注入速度的增加而增大。

### 2.2 注入速度对气体突破时间的影响

由不同注入速度下空气泡沫驱气体突破时间与采收率的关系(表2)可知,在注入速度分别为0.01,0.02和0.05 mL/min的条件下,分别注入0.65,0.65和0.57倍孔隙体积的空气泡沫后均有气体产出,空气泡沫驱替介质的注入速度越快,气体突破时间越早。气体突破时的采收率较初始水驱分别增加3.66%,3.41%和3.97%。分析认为,由于空气泡沫驱阶段始终是起泡剂溶液与空气交替注入,后期并不会产生明显的气窜,这点从空气泡沫驱阶段结束时采收率的提升幅度也可以得到证明。

实验阶段	注入速度 / (mL·min <sup>-1</sup> )								
	0.01			0.02			0.05		
	注入时间/min	注入孔隙体积倍数	采收率,%	注入时间/min	注入孔隙体积倍数	采收率,%	注入时间/min	注入孔隙体积倍数	采收率,%
初始水驱	5 100	1.82	24.28	2 760	1.97	29.84	1 040	1.86	33.07
气体突破	6 900	2.47	27.94	3 660	2.62	33.25	1 360	2.43	37.04

### 2.3 空气泡沫注入量对采收率的影响

为研究空气泡沫注入量对采收率的影响,在注入速度为0.05 mL/min的条件下,增加了1组空气泡沫注入总量为0.6倍孔隙体积的对比实验。由不同空气泡沫注入量下注入孔隙体积倍数与采收率的关系(图2)可以看出,在同一注入速度下,初始水驱的采收率大致相同,转为空气泡沫驱后,当空气

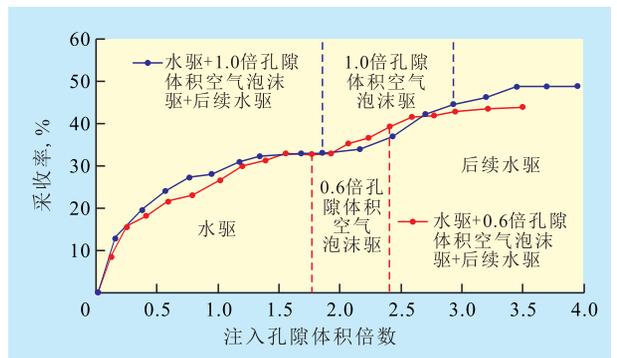


图2 空气泡沫注入量对采收率的影响

泡沫注入量分别为0.6和1.0倍孔隙体积时,该阶段采收率分别可达到39.32%和44.44%,较初始水驱分别增加了6.52%和11.37%;后续水驱结束时采收率分别为43.75%和48.94%,较初始水驱阶段分别增加了11.2%和15.87%。分析认为,增加空气泡沫的注入量,在岩心中形成的泡沫就越充分,同时泡沫段的长度也越长,作用范围也相应增大,在泡沫的封堵作用下,空气流度降低,气体突破时间延长,从而提高了洗油效率和空气泡沫驱的采收率。

### 3 结论

实验条件下,模拟镇泾油田低渗透油藏初始水驱阶段的平均采收率为29.06%。在水驱转空气泡沫驱再转水驱的过程中,采收率均有明显提高,最终采收率平均为45.42%,较初始水驱平均值高16.36%。

随着驱替介质注入速度的增加,最终采收率随之增大,气体突破时间则随之缩短,但气窜对采收率的影响很小。在注入速度分别为0.01、0.02和0.05 mL/min的条件下,空气泡沫驱阶段结束时的采收率在初始水驱的基础上分别提高了13.32%、13.09%和11.37%。

当空气泡沫注入量从0.6倍孔隙体积增大到1倍孔隙体积时,最终采收率可增加5.19%,表明适当增大空气泡沫注入量能使低渗油藏水驱采收率得到进一步提高。

#### 参考文献:

- [1] 黄文芬,秦学杰,杜笑咏.弱挥发性黑油油藏注水及注气开发效果研究[J].油气地质与采收率,2012,19(4):87-89.
- [2] 娄毅,杨胜来,章星,等.低渗透油藏二氧化碳混相驱超前注气实验研究——以吉林油田黑79区块为例[J].油气地质与采收率,2012,19(5):78-80.
- [3] 任韶然,于洪敏,左景栾,等.中原油田空气泡沫调驱提高采收率技术[J].石油学报,2009,30(3):414-416.
- [4] 宋娟娟,许耀波,曹晶,等.低渗透油藏空气泡沫复合驱室内实验研究[J].特种油气藏,2009,16(5):79-81.
- [5] 张力,董立全,张凯,等.空气-泡沫驱技术在马岭油田试验研究[J].新疆地质,2009,27(1):85-88.
- [6] 于洪敏,任韶然,左景栾,等.注空气泡沫低温氧化工艺提高采收率试验[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(2):94-98.
- [7] 王杰祥,来轩昂,王庆,等.中原油田注空气驱油试验研究[J].石油钻探技术,2007,35(2):5-7.
- [8] 蒋有伟,张义堂,刘尚奇,等.低渗透油藏注空气开发驱油机理[J].石油勘探与开发,2010,37(4):471-476.
- [9] 张积耀,高瑞民,余华贵,等.低温低压油藏注空气提高采收率耗氧初探[J].油气地质与采收率,2012,19(5):81-83.
- [10] 杨红斌,蒲春生,吴飞鹏,等.空气泡沫调驱技术在浅层特低渗透低温油藏的适应性研究[J].油气地质与采收率,2012,19(6):70-72.
- [11] 王勇.新疆油区低渗透油藏注空气提高采收率潜力评估研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.
- [12] 付美龙,黄俊.轻质油油藏注空气催化氧化技术效果评价[J].特种油气藏,2014,21(1):117-119.

编辑 刘北羿

#### (上接第103页)

- [7] Zhang L, Luo L, Zhao S, et al. Effect of different acidic fractions in crude oil on dynamic interfacial tensions in surfactant/alkali/model oil systems [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 41(1/3): 189-198.
- [8] 李士奎,朱炎,赵永胜,等.大庆油田三元复合驱试验效果评价研究[J].石油学报,2005,26(3):56-59,63.
- [9] 陈业泉,曹绪龙,王得顺,等.胜利油区复合驱油体系研究及表面活性剂的作用[J].精细石油化工,2002,19(5):19-21.
- [10] 王芳,田秀芳,白琰,等.有机碱/HPAM二元复合驱体系的研究[J].精细石油化工进展,2009,10(8):12-14.
- [11] Rahman M S, Hossain M E, Islam M R. An environment-friendly alkaline solution for enhanced oil recovery [J]. Petroleum Science and Technology, 2008, 26(13): 1 596-1 609.
- [12] 郭兰磊.孤东油田有机碱与原油相互作用界面张力变化规律[J].油气地质与采收率,2013,20(4):62-64.
- [13] 方洪波,王磊,宗华,等.胜利原油各组分对界面膜扩张流变性的影响[J].石油学报:石油加工,2011,27(5):746-752.
- [14] Zhou Z H, Zhang Q, Liu Y, et al. Effect of fatty acids on interfacial tensions of novel sulphobetaines solutions [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 1 020-1 027.
- [15] 刘立伟,侯吉瑞,岳湘安.大庆原油中活性物质对界面张力的影响[J].油气地质与采收率,2011,18(2):58-61.

编辑 刘北羿