

文章编号:1673-5005(2009)02-0094-05

注空气泡沫低温氧化工艺提高采收率试验

于洪敏¹, 任韶然¹, 左景栾¹, 王瑞和¹, 林伟民²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中原油田 采油工程技术研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要:针对中原油田胡12块油藏非均质性严重及水驱效果差的现状,对原油-空气泡沫的氧化特性、封堵效果及其影响因素、驱油效果进行模拟试验研究。结果表明:胡12块原油具有较好的氧化活性,温度、压力、含水饱和度与黏土含量对氧化速率都有影响;空气泡沫的存在对原油静态氧化有一定影响,而对油藏条件下的动态氧化影响不大;气液比为1:1~2:1、温度越低、压力及岩心渗透率越高时,泡沫稳定性越好,封堵能力越强;空气泡沫驱阶段可提高驱油效率13%~24%,适用于非均质严重地层提高原油采收率。

关键词:空气泡沫;低温氧化;封堵能力;提高采收率;非均质性

中图分类号:TE 357.7 **文献标识码:**A

Experiment of improved oil recovery by air foam injection low temperature oxidation process

YU Hong-min¹, REN Shao-ran¹, ZUO Jing-luan¹, WANG Rui-he¹, LIN Wei-min²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Oil Production Engineering Technology Institute of Zhongyuan Oilfield, Puyang 457001, China)

Abstract: Aimed to the poor performance of waterflood due to serious heterogeneity of block Hu 12 in Zhongyuan Oilfield, the simulation experiments of oxidation characteristics, shut-off capability and its influence factors, and oil displacement efficiency were conducted. The results show that the oil of block Hu 12 has good oxidation activity, and the temperature, pressure, water saturation and clay content have effect on oxidation rate. Air foam can reduce oxidation rate at static conditions, but this effect is not significant at dynamic (flooding) conditions. The ratio of air and foaming liquid with a range from 1:1 to 2:1 has much effect on the stability and shut-off capability of air foam. And the stability and shut-off capability of air foam increase with the temperature decreasing, pressure and permeability increasing. Air foam injection can increase oil recovery efficiency by 13%-24% after water flooding in the experiment of sand-pack displacement. This technology could effectively improve oil recovery efficiency of heterogeneous reservoir.

Key words: air foam; low temperature oxidation; shut-off capacity; improved oil recovery; heterogeneity

注空气泡沫(低温氧化)工艺综合了空气驱与泡沫驱的优点,气源丰富、成本低,不仅具有传统注气作用、烟道气驱与热效应,而且可以封堵高渗层气窜、降低含水率、提高波及系数与驱油效率,逐渐成为开发轻质类油藏的一项高效技术^[1-5]。该技术已在广西百色、胜利、陕北旗胜等油田得到应用,但国内关于注空气泡沫低温氧化相关方面的研究报道较少。基于此,笔者针对中原油田非均质严重的胡12

块中高渗轻质油藏,开展注空气泡沫提高采收率机理与氧化、封堵及驱油试验研究,以实现封堵高渗层气/水窜,改善注空气/水开发效果,并为数值模拟及现场试验提供理论依据。

1 空气泡沫驱提高采收率机理

注空气低温氧化工艺中注入氧气可在油藏条件下(一般温度不低于60℃)与原油发生自发的低温

收稿日期:2008-12-15

基金项目:中国石油化工集团公司先导性科技项目(P06051);山东省泰山学者建设基金项目(TSXZ2006-15)

作者简介:于洪敏(1981-),男(汉族),山东昌邑人,博士研究生,主要从事注气提高采收率技术研究。

氧化反应,有效地驱替原油。空气驱的氧化驱油特性同样适用于空气泡沫驱^[6,9]:油藏原油与注入氧气(空气泡沫破裂释放出空气)发生自发的低温氧化(LTO)放热反应,消耗氧气生成碳的氧化物,反应产生的热量使油层温度升高,促使轻质组分蒸发,从而使油层内生成的CO、CO₂、N₂和蒸发的轻烃组分等形成烟道气驱,提高轻质油藏的地层能量及原油采收率。

泡沫具有遇水稳定、遇油消泡的性质^[10-11],采油过程中利用其选择性分流作用堵塞地层水,从而防止含水率快速上升;泡沫在后续的水驱过程中需数十倍的孔隙体积水才基本驱尽,表明泡沫足以维持驱油效果;泡沫还具有剪切稀释特性,对于高渗透地层,岩石对泡沫的剪切较弱,泡沫的表观黏度相对高于低渗透层,有利于泡沫在低渗层中运移、提高波及系数,而高渗透层中泡沫则趋于黏附和堵塞地层大孔道,原因是此时泡沫流速变快、贾敏效应更严重,因此可改善非均质严重轻质油藏的驱油效果,室内试验结果也证实了这一点^[12];泡沫的贾敏效应对空气具有较强的封窜作用,可增加空气在地层中的滞留时间,延迟空气的突破,使注入氧含量降低,保证安全生产;泡沫还可改善驱替液与原油的流度比,提高波及体积与驱油效率。

2 原油-空气/空气泡沫氧化试验

2.1 原油-空气/空气泡沫静态氧化特性

利用静态氧化试验(80~110℃,10~20MPa)考察不同因素(初始温度、压力、含水饱和度、黏土含量、泡沫)对原油与空气/空气泡沫氧化反应的影响,试验装置见图1。试验用泡沫液由0.6%ZY-1型阴离子起泡剂+0.5%稳泡剂+模拟地层水优化

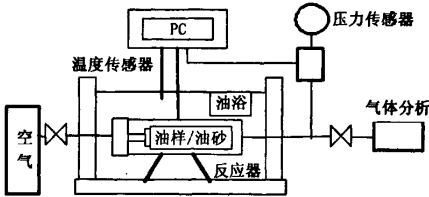


图1 高压恒温氧化反应流程图
Fig.1 Flow diagram of high-pressure constant temperature oxidation reaction

配置而成,具有耐高温、稳泡时间长、气泡体积大等特点,试验原油取自中原油田胡12块,人工填砂。

将填充纯油或油砂的反应器放入油浴中,起泡剂与空气(20MPa,100~110℃,气液比1:1)混注到

反应容器中,加热恒温;反应过程中容器内压力不断降低,待其恒定后(3~6d),根据压力降计算氧化反应速率(单位体积原油单位时间所消耗O₂物质的量),取样测试产气中O₂和CO₂含量。

初始温度与压力、含水饱和度与黏土含量、泡沫对氧化反应速率的影响见图2、表1和图3。从图2可以看出,随着初始温度与压力的升高,原油活性增强,与氧气的接触面积增大,使得氧化反应速率增加幅度变快。

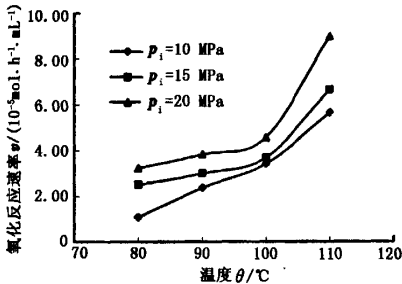


图2 不同初始压力下温度对氧化反应速率的影响

Fig.2 Effects of temperature on oxidation reaction rate for different initial pressures

表1 含水饱和度和黏土含量对静态氧化反应的影响
Table 1 Effects of water saturation and clay content on static oxidation reaction

含水饱和度 $S_w/\%$	反应后 O ₂ 含量 $w_{O_2}/\%$	反应后 CO ₂ 含量 $w_{CO_2}/\%$	反应速率 $v/(10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1})$
0	18.6	0.8	2.60
30	16.1	1.0	3.83

黏土	反应后 O ₂ 含量 $w_{O_2}/\%$	反应后 CO ₂ 含量 $w_{CO_2}/\%$	反应速率 $v/(10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1})$
无	18.4	0.6	3.47
有	16.1	1.0	3.83

从表1(20MPa,90℃)可以看出,模型中水(30%)与黏土(5%)的存在都加快了静态氧化反应速率,原因是水的存在增大了原油与氧气的接触面积,而黏土中含有氧化反应催化剂。

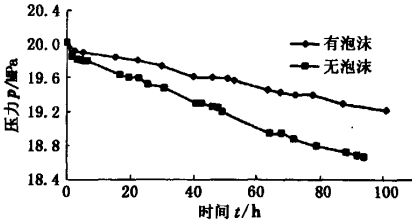


图3 泡沫对原油静态氧化反应的影响

Fig.3 Effects of air foam on static oxidation reaction

从图3(20MPa,100℃)可以看出,泡沫(气液比1:1)明显降低了氧化反应速率(约45%),因为泡

沫液膜减小了原油与空气的接触面积,阻碍或延缓了氧化反应。但实际油藏中,泡沫的产生与破灭是一个动态变化的过程,若反应时间很长(与室内试验相比),泡沫对低温氧化效果影响不大。

2.2 原油-空气/空气泡沫动态氧化特性

试验装置如图4所示。将砂、黏土、原油与水混合均匀装入大型填砂管;填砂管初始恒温90℃,初始压力20 MPa,用流量计控制气体注入流量;记录填砂管两端压力,取样检测O₂和CO₂含量;待气体含量稳定后升温至100℃,再稳定后注入空气泡沫(气液比1:1)。图5为不同温度下动态氧化反应产出气体含量曲线。

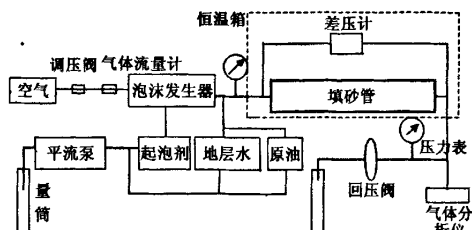


图4 动态氧化和提高采收率试验装置示意图

Fig.4 Schematic drawing for experimental set-up of dynamic oxidation and improved oil recovery

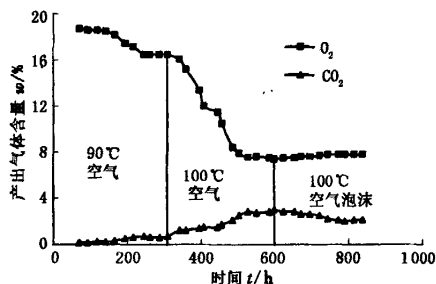


图5 原油-空气/空气泡沫动态氧化反应产出气体曲线

Fig.5 Gas content in dynamic oxidation experiments of oil and air/air foam

从图5可以看出:温度越高,氧气消耗越快,产出气体中氧含量越低;注空气泡沫相对于注空气而言,相同条件下产出气体成分相差不大(O₂含量略为升高,CO₂含量略为降低);与静态试验相比,泡沫对动态氧化反应速率的影响不大,在油藏条件下原油仍能有效地消耗氧气。

3 空气泡沫封堵能力试验

为了评价空气泡沫的封堵特性,进行泡沫封堵能力试验,基本参数如下:填砂模型尺寸为 $\Phi 8\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ (大管)与 $\Phi 2.5\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ (小管),水测

渗透率为 $0.5 \sim 0.6\text{ }\mu\text{m}^2$,含油饱和度为35%~40%,注入压力为5.2~9.0 MPa,恒温60~90℃,注入空气与泡沫液的气液比为0.5:1~3:1。

3.1 试验方法与步骤

将填砂模型(小管)抽真空,以0.5 mL/min速度水驱,至含水率98%时将起泡剂与空气通过泡沫发生器(地面发泡)混合注入岩心,实时测量模型两端压差,计算阻力系数。

泡沫阻力系数 R_f 为泡沫体系在岩心运移达到平衡时,岩心两端所建立的压差(Δp_f)与单纯注水时压差(Δp_b)的比值,即 $R_f = \Delta p_f / \Delta p_b$, R_f 是评价泡沫封堵能力的重要指标。

3.2 泡沫封堵效果影响因素分析

3.2.1 气液比

图6为不同气液比时注入孔隙体积倍数与阻力系数(即封堵能力)的关系曲线。从图中看出:随着注入量的增大,泡沫封堵能力不断增强而趋势变缓,说明泡沫已占据绝大部分孔隙;随着气液比的增大,泡沫封堵能力先增强后减弱,说明气量过多使得泡沫液膜变薄,稳定性下降;当气液比为1:1~2:1时,泡沫效果最好,封堵能力最强。

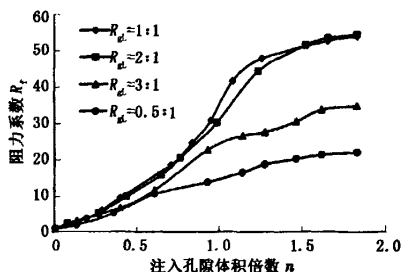


图6 注入孔隙体积倍数与阻力系数的关系

Fig.6 Relationship of resistance coefficient and times of injection pore volume

3.2.2 温度与压力

不同温度(60~90℃)与压力(5.2~9.0 MPa)下的泡沫封堵效果试验表明:温度对泡沫的稳定性影响比较明显,温度降低时泡沫的封堵能力大大增强;压力升高可以增强泡沫的封堵能力,原因是随着压力的升高,泡沫直径变小,稳定性增强。

3.2.3 渗透率

常温、压力5.0 MPa的泡沫封堵试验(未饱和油、未加稳泡剂)中,模型渗透率为0.55,1.87,4.00,7.62 μm^2 时,试验测得阻力系数分别为2.54,6.74,7.83,8.33,表明泡沫的封堵能力随渗透率的增加而增强,与胜利油田泡沫驱试验的结论相

似^[13],油藏中表现为对高渗层封堵能力较强。当渗透率超过一定值后,封堵能力增强幅度变缓,且可能存在临界渗透率值恰好使泡沫不能生成。

4 空气泡沫提高采收率试验

为了评价空气泡沫的驱油特性,进行空气泡沫提高采收率试验,装置流程见图 4。

表 2 空气泡沫提高采收率试验参数及测试结果

Table 2 Parameters and results of air foam improved oil recovery experiments

模型	填砂管	压力 p/MPa	含油 饱和度 $S_o/\%$	孔隙度 $\varphi/\%$	水测 渗透率 $k/\mu\text{m}^2$	注入组合孔隙体积倍数 n					提高采收率幅度 $E_R/\%$			
						水驱	空气驱	空气 泡沫驱	后续 水驱	累积	水驱	空气驱	泡沫 驱阶段	总采 收率
均质 1	大管	20	85.80	40.20	1.32	1.97	0.3	0.88	0.9	4.05	44.8	2.3	18.3	65.4
均质 2	大管	20	81.70	40.76	1.01	1.87	0.63	0.91	0.72	4.13	58.9	1.2	13.1	76.3
均质 3	小管	9.0	88.32	45.60	1.083	1.84	—	0.64	0.51	2.99	38.9	—	21.4	60.3
非均质	双管	9.0	83.18, 89.05	40	0.474, 5.06	1.96	—	0.59	0.57	3.12	38.2	—	23.6	61.8

4.1 均质模型试验评价

图 7 为驱油效率与注入量的关系曲线。从图 7 可以看出:累积注入起泡剂的孔隙体积倍数为 0.3~0.45;均质模型试验中,水驱至 $(1.8\sim2.0)V_p$ 后已基本不再产油,采收率约为 40%;由于模型管较短且渗透率较大,使得空气驱阶段气体过早沿管壁及水驱通道突破,气驱采收率仅 2% 左右;在空气泡沫驱阶段(泡沫驱+后续水驱),泡沫降低了空气流量,封堵了空气突破,驱油效率提高约 13%~21%,最终采收率可超过 60%。

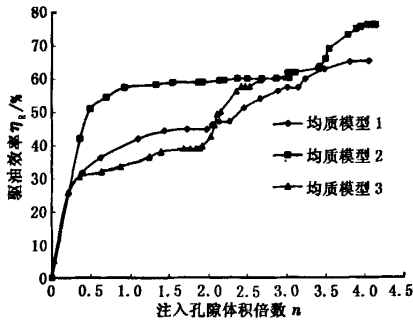


图 7 均质模型注入量与驱油效率的关系

Fig. 7 Relationship of oil displacement efficiency and injection pore volume in homogeneous models

4.2 非均质模型试验评价

图 8 为非均质模型试验结果。从图 8 中看出:水驱至 $2.0 V_p$ 后已基本不再产油,采收率达 38.2%;然后进行空气泡沫驱(共计 $0.6 V_p$),模型两端压差与产油量迅速增大,说明泡沫较好地封堵了高渗管,使低渗管的波及系数增加,总体上可提高驱油效率 23.6%,最终采收率达到 61.8%。

将填砂模型抽真空,饱和水并测量岩心渗透率;恒温,饱和油;进行水驱,至含水率 98% 时进行空气驱,待气体突破后进行泡沫驱(气液比 1:1),再进行后续水驱。实时记录填砂管两端压力、产油及产水量,计算不同阶段的原油采出程度。试验基本参数及结果见表 2(试验温度为 90 ℃)。

当空气泡沫驱替试验气体突破后,连续注入空气/泡沫,实时监测氧化反应产出气体(O_2 与 CO_2)的含量。结果表明,动态驱替条件下,原油与注入空气中的氧气同样发生了自发的低温氧化反应,生成 CO_2 并放热^[9],形成的氧化前缘与烟道气驱也有利于提高驱油效率。

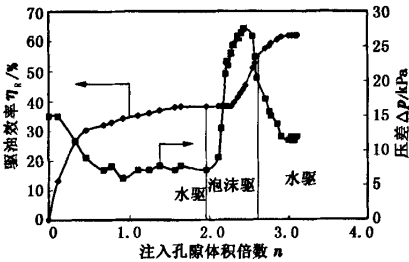


图 8 非均质模型驱油效率及驱替压差与注入量的关系

Fig. 8 Relationship of oil displacement efficiency and pressure difference and injection pore volume in heterogeneous model

5 氧含量安全性分析

根据室内研究结果^[14],建议注空气/空气泡沫现场试验时应采取安全控制方案。井场操作时,当监测到生产井内氧气含量超过 5% 时应启动安全预警措施;当氧气含量达到 8% 时,油井关井,注入井停注。关井一段时间后,连续取样监测氧气含量,当氧气含量小于 5% 时,油井恢复生产;当氧气含量小于 3% 时,注入井恢复注入空气、空气泡沫或注水等措施。

静、动态氧化试验表明:反应后氧气含量仍比较高(大于 10%),主要原因是室内高压反应器及填砂

模型管达不到油藏条件下的近绝热状态,产生的热量很快散失,不足以加速低温氧化反应;室内模型管相对于实际油藏来说短得多,氧气滞留时间短,达不到完全消耗,导致产出气体 O_2 含量偏高, CO_2 含量偏低。但实际油藏条件下,注采井距一般大于 300 m,注入的空气能在油层内完全消耗掉,生产井不会出现因 O_2 含量高产生的安全隐患。

6 结 论

(1)空气泡沫驱的氧化反应速率受温度、压力影响较大,高温高压下,氧化速率高。水与黏土的存在都有利于油砂静态氧化反应的进行。试验条件下,泡沫对静态氧化速率有较大影响,但在油藏动态条件下影响不大。

(2)氧化反应活化能是压力的函数,随压力增加而减小,说明氧化反应更易进行。很少量的剩余油即能消耗足够多的氧气,若不发生气窜,生产井中氧气突破及对产油污染的可能性较低。

(3)低气液比时,泡沫封堵能力(阻力系数)随气液比增大而增大,大于 2:1 时变化趋势相反,建议现场施工的最佳气液比为 1:1 ~ 2:1。温度降低、压力升高及模型渗透率增大时,泡沫的封堵能力增强。

(4)空气泡沫具有较好的驱油效果,驱替试验累积注入起泡剂约 $(0.3 \sim 0.45) V_p$,驱油效率可达 13% ~ 24%。非均质油藏中泡沫可封堵高渗层,实现低渗层较好的波及效率,有利于实现空气低温氧化作用,消除氧气的爆炸隐患。

参考文献:

- [1] GILLHAM T H, CERVENY B W, TUREK E A, et al. Keys to increasing production via air injection in Gulf Coast light oil reservoirs[R]. SPE 38848, 1997.
- [2] 赵斌,高海涛,杨卫东. 中原油田注空气提高采收率潜力分析[J]. 油气田地面工程, 2005, 24(5): 22-23.
ZHAO Bin, GAO Hai-tao, YANG Wei-dong. Potentials of improved oil recovery by air injection in Zhongyuan Oilfield[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2005, 24(5): 22-23.
- [3] PASCUAL M, CROSTA D, LACENTRE P, et al. Air injection into a mature waterflooded light oil reservoir: laboratory and simulation results for Barrancas Field, Argentina[R]. SPE 94092, 2005.
- [4] STOKKA S, OESTHUS A, FRANGEUL J. Evaluation of air injection as an IOR method for the Giant Ekofisk Chalk Field[R]. SPE 97481, 2005.
- [5] 王杰祥,任韶然,来轩昂,等. 轻质油田注空气提高采收率技术研究[C]//苏义脑,刘扬,刘永建,等. 中国油气钻采新技术高级研讨会论文集. 北京:石油工业出版社, 2006: 351-359.
- [6] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Air injection LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal 57005-PA, 2002, 7(1): 90-99.
- [7] GREAVES M, REN S R, XIA T X. New air injection technology for IOR operations in light and heavy oil reservoirs[R]. SPE 57295, 1999.
- [8] GREAVES M, REN S R, RATHBONE R R. Improved residual light oil recovery by air injection (LTO process) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, 39(1): 57-61.
- [9] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Oxidation kinetics of north sea light crude oils at reservoir temperature [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1999, 77(5): 385-394.
- [10] 李兆敏,孙茂盛,林日亿,等. 泡沫封堵及选择性分流实验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 115-118.
LI Zhao-min, SUN Mao-sheng, LIN Ri-yi, et al. Laboratory study on foam plugging and selective divided-flow [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 115-118.
- [11] RENKEMA W J, ROSSEN W R. Success of SAG foam processes in heterogeneous reservoirs[R]. SPE 110408, 2007.
- [12] 吕广忠,刘显太,尤启东,等. 氮气泡沫热水驱油室内实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(5): 50-53.
LÜ Guang-zhong, LIU Xian-tai, YOU Qi-dong, et al. Experiment on nitrogen hot-water foam flooding in laboratory[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(5): 50-53.
- [13] 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.
- [14] 吉亚娟,周乐平,任韶然,等. 油田注空气工艺防爆实验的研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(2): 87-92.
JI Ya-juan, ZHOU Le-ping, REN Shao-ran, et al. Study on explosion proof experiment for oil field air injection EOR process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(2): 87-92.

(编辑 李志芬)