

引用格式:姚振杰,江绍静,高瑞民,等.延长油田低温低渗油藏空气泡沫驱矿场实践[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):108-112.

YAO Z J, JIANG S J, GAO R M, et al. Field practices of air foam flooding in low temperature and low permeability reservoirs of Yanchang Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 108-112.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.01.017

延长油田低温低渗油藏空气泡沫驱矿场实践

姚振杰,江绍静,高瑞民,王伟,杨红

(陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西 西安 710065)

摘要:延长油田T区块油藏具有低温低渗的特点,注水井和油井大多经过重复压裂,水驱开发过程中存在沿裂缝或优势通道水窜的问题,进而导致注水开发效果差。针对T区块水驱开发存在的问题,结合空气泡沫驱油的优势,2007年开始实施空气泡沫驱矿场试验,探索低温低渗油藏空气泡沫驱可行性,并取得了一定的效果。鉴于前期试验效果,研究区于2011年后陆续扩大空气泡沫驱矿场应用规模。目前,经过多年的空气泡沫驱矿场实践,延长油田低温低渗油藏空气泡沫驱见到了较好的效果,并形成了完整的配套工艺技术及安全保障措施。矿场应用表明:约有70%的单井见效,区块单井月均产油增加了2.2 t,综合含水降低了25个百分点,提高阶段采出程度达1.21%,延长油田低温低渗油藏空气泡沫驱见到较好效果。

关键词:低渗;低温;空气泡沫驱;防窜;矿场实践

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Field practices of air foam flooding in low temperature and low permeability reservoirs of Yanchang Oilfield

YAO Zhenjie, JIANG Shaojing, GAO Ruimin, WANG Wei, YANG Hong

(Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: The oil reservoirs in Block-T of Yanchang Oilfield have the characteristics of low temperature and low permeability. Most of injection wells and oil wells have been fractured repeatedly, and the effect of water injection development is poor because of the water breakthrough along fracture or dominant channels. In order to solve the problems existing in the water flooding development of Block-T, combined with the advantages of air foam flooding, its field test was carried out in 2007 to explore its feasibility in low temperature and low permeability reservoirs and certain effects had been obtained. Based on the effects of the preliminary tests, its site application scale expanded after 2011. After years of field tests, the air foam flooding shows good effects in the low temperature and low permeability reservoirs now, and the complete supporting technology and safety guarantee measures have been formed. The field test shows that the measures applied in about 70 % of the single wells are effective, the average oil production per month of single well increases by 2.2 t, the comprehensive water cut reduces by 25 %, and the oil recovery improves by 1.21 %. The air foam flooding has a good effect in low temperature and low permeability reservoirs of Yanchang Oilfield.

Key words: low permeability, low temperature, air foam flooding, control the water breakthrough, field practice

近年来,随着对各大油田深入的开发,低渗透油田的开发比例不断提高^[1-3]。低渗透油藏由于受油藏储层物性特征的限制^[4-5],比常规油藏开采难度大^[6-8]。低渗透油藏受储层非均质性的影响,储层中

很大一部分原油未被动用,低渗透油藏的开发需要探索新方式^[9-10]。泡沫具有“堵大不堵小、堵水不堵油”的特性,空气具有气源丰富、成本低等优势。空气泡沫驱油技术引起石油行业广泛的关注^[11-13]。

收稿日期:2019-02-02。

第一作者简介:姚振杰(1985—),男,研究生,工程师,从事低渗透油田开发及提高采收率技术的研究。通讯地址:陕西省唐延路61号延长石油科技中心裙楼四楼采收率技术研究所,邮政编码:710065。E-mail:155239211@qq.com

延长油田T区块主力开发层位为三叠系长6油层组,储层平均渗透率为 $0.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔隙度为7.9%,油藏温度为26~30℃,属于典型的低温低渗透油藏。储层非均质性较强,储层大多经过多次重复压裂,裂缝复杂,依据相关研究表明裂缝等效渗透率为 $(300 \sim 1\ 000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝渗透率变化较大^[14-15]。水驱开发过程中,注水沿裂缝水窜严重,开发效果差。长期以来,T区块面临着如何扩大储层波及体积、提高油层动用程度、提高原油采收率并有效提高地层能量等难题。2007年9月延长油田在T区块开展了空气泡沫驱油试验,鉴于前期试验取得较好效果,T区块空气泡沫驱油规模不断扩大。对延长油田低温低渗透油藏空气泡沫驱油矿场实践进行论述,为低渗透油藏开展空气泡沫驱提供指导。

1 矿场试验现状

2007年9月T区块开始第一批空气泡沫驱试验,启动2口注入井、17口受益油井的试验规模。2011年10月至2013年11月扩大试验规模,开展第二批试验,增加6口注入井、26口受益油井。鉴于前期较好的试验效果,2013年11月至2016年4月,注入井增加8口、受益油井增加28口,为第三批试验井。2016年4月至2017年8月,将空气泡沫驱技术进一步推广应用,T区块又增加注入井45口、增加受益油井188口。最终T区块形成61口注入井、258口受益油井的空气泡沫驱规模。

截至2017年12月,T区块累计注水 $5.22 \times 10^5 \text{ m}^3$,累计注入空气 $9.89 \times 10^4 \text{ m}^3$ (折算地下体积),累计注入泡沫液 $3.69 \times 10^4 \text{ m}^3$,采出程度10.66%,综合含水50.57%。目前单井月均产液 12.4 m^3 ,单井月均产油5.9 t。

2 空气泡沫体系分流转向实验评价

对优选出的泡沫体系,通过驱替双管并联非均质岩心进行评价(图1)。泡沫体系具有“堵大不堵小”的特征,储层渗透率越大,泡沫表观黏度越大。泡沫体系注入储层后,优先进入微裂缝或大孔道等优势渗流通道,随着泡沫体系注入量的增加,泡沫体系在优势渗流通道中堵塞,渗流阻力升高,迫使后续注入的流体进入低渗透层,扩大注入流体波及体积。

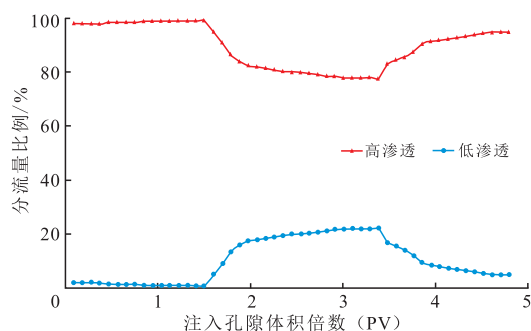


图1 空气泡沫体系分流转向能力评价

Fig. 1 Distributary and steering capacity evaluation of air foam

室内实验选取直径25 mm、高度100 mm的柱状人造岩心,有效渗透率和渗透率为 $1\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心组成双管并联非均质模型进行分流转向能力实验研究。实验用水为T区块处理污水,使用前经 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔过滤,除去杂质。

水驱稳定后高渗透岩心分流比例是98%,低渗透岩心分流比例是2%。空气泡沫体系驱稳定后高渗透岩心分流比例是78%,低渗透岩心分流比例是22%;后续水驱稳定高渗透岩心分流比例是95%,低渗透岩心分流比例是5%。开始水驱,由于高渗透岩心孔道较大、渗流阻力小,注入水主要沿着非均质模型的高渗透岩心流动,水驱稳定后高渗透岩心所占分流比例大。注入空气泡沫体系后,泡沫体系优先进入非均质模型的高渗透岩心,体系对高渗透岩心的大孔道进行有效封堵,对后续注入的流体起到了分流转向作用,低渗透岩心分流比例增大,扩大了泡沫体系波及体积。空气泡沫体系可以降低优势通道的分流比例,提高低渗透层的分流比例,起到分流转向的作用,扩大非均质储层的波及体积。

3 延长油田空气泡沫驱矿场应用效果

T区块空气泡沫驱分四批次投入运行,由于投入运行时间不一致,为了客观评价空气泡沫驱应用效果,分批次对T区块空气泡沫驱应用效果进行了评价(本文应用效果评价以第三批为例)。区块井网不规则,油井大多经过多次重复压裂,储层裂缝复杂,注水沿缝水窜严重。T区块实施空气泡沫驱试验后,油井反应敏感,见效快,一般注入后2~6个月即见效。对于延长油田低温低渗油藏,空气泡沫驱起到了较好

的“稳油、控水”效果。

3.1 产能变化

3.1.1 单井产能变化

从单井见效特征看,实施空气泡沫驱后,相对于水驱,部分受效井产油量明显升高、含水明显降低;部分受效井经过多年开发产油量、含水依旧保持稳定;少数生产井未见效。

T1-7井见效前(水驱阶段)月产油3.8 t,含水为80%。实施空气泡沫驱油后,产油明显升高,含水大幅度降低,目前月产油为15.3 t,含水为10%。实施空气泡沫驱较水驱月产油量增加了11.5 t,含水降低了70个百分点。这是由于空气泡沫体系首先进入高渗透层,并对高渗透层起着调剖、封堵的作用,生产井产油量升高;随着空气泡沫体系的不断注入,高渗透层受到封堵,空气泡沫体系进入低渗透层,扩大波及体积,生产井继续进入受效期(图2)。

17口(61%)生产井产油量明显升高,3口(11%)生产井实施空气泡沫驱后经过长期开发产油量仍保持稳定,另外8口(28%)生产井产油量未见效。未见效分析原因:一是注采层位不对应;二是注入介质量不足、地层能量不足而未建立起有效驱替体系。另外,结合其他批次受效井见效统计,实施空气泡沫驱后约有70%的单井见效,30%的单井未见效。

T区块第三批受效有19口(68%)生产井含水明显降低,4口(14%)生产井含水保持稳定,5口(18%)生产井未见效。总体而言,T区块第三批井实施空气泡沫驱后,82%的生产井含水降低或稳定,18%的生产井含水未见明显变化。同时,结合其他

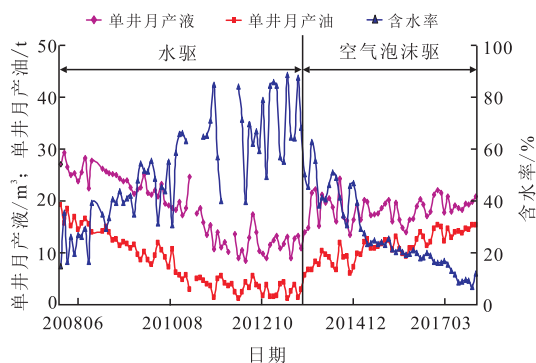


图2 T1-7井水驱与空气泡沫驱开采曲线对比
Fig. 2 Contrast of production curves of water flooding and air foam flooding of well-T1-7

批次受效井见效统计,实施空气泡沫驱后约有70%~80%的生产井含水降低或稳定,20%~30%的生产井含水未见效(图3)。

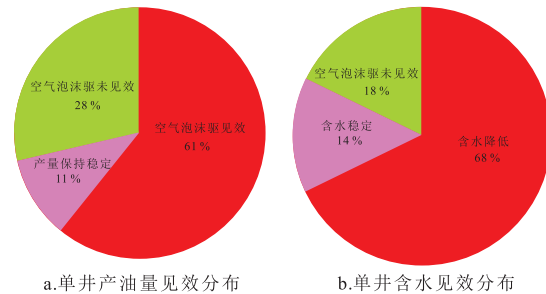


图3 T区块第三批实施空气泡沫驱单井见效分布
Fig. 3 Effective situation of the third group of single wells by air foam flooding Block-T

3.1.2 区块产能变化

空气泡沫驱油后,区块单井月均产油开始升高,区块含水大幅度降低,空气泡沫驱起到了较好控水作用(图4)。注水开发阶段单井月产油6.3 t左右,实施空气泡沫驱后单井月产油开始升高,目前单井月均产油8.5 t,单井月产油增加了2.2 t;区块综合含水降低了25个百分点。T区块第三批空气泡沫驱区块相对水驱提高采出程度1.21%。

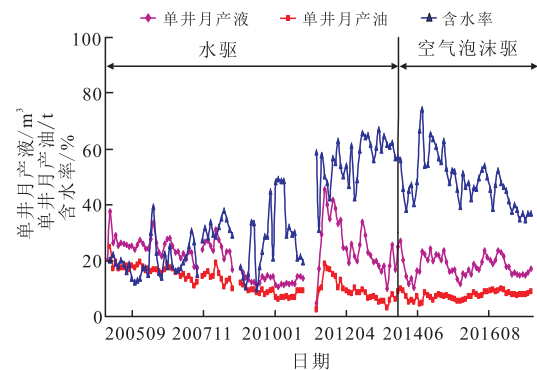


图4 T区块水驱与空气泡沫驱开采曲线对比
Fig. 4 Contrast of production curves of water flooding and air foam flooding of Block-T

3.2 安全保障措施

对空气泡沫区受益油井套管气氧含量定期监测,实时掌握油井套管气氧含量的变化。注空气后,氧气与地下原油的低温氧化、与地层矿物的氧化、在地层岩石表面吸附滞留、在地层水或原油中溶解等是主要的耗氧途径。氧气发生反应后,剩余的氧气

就会与地层中的轻烃组分形成混合性爆炸气体,当混合气的浓度达到爆炸范围,在一定条件下就会发生爆炸事故。根据相关资料,天然气爆炸必须具备3个条件:1)合适的天然气浓度,空气中(氧浓度21%)天然气浓度在3.21%~10.32%,浓度大于或小于这个范围都不会爆炸;2)合适的氧浓度,大于10%~11%;3)高温火源的存在。为了防止事故的发生,必须控制氧气含量在安全含量以下。

T区块经过12年的空气泡沫驱矿场实践,随着

空气的不断注入,套管气氧含量监测表明氧含量缓慢升高。2008年6月T5-2套管气中氧含量为1.9%、T5-8套管气中氧含量为1.67%;2015年11月T5-2套管气中氧含量上升到5.65%、T5-8套管气中氧含量上升到2.46%。为了保障生产安全,随后在空气压缩机前增加了氮气分子筛,降低空气中的氧含量。经过现场氧含量监测,目前T区块空气泡沫受益生产井的氧含量均低于3.5%,远低于临界爆炸浓度(表1)。

表1 套管气氧含量变化
Table 1 Variation of oxygen content of casing gas

井号	测试时间	各组分含量/%									
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₅ H ₁₂	n-C ₅ H ₁₂	C ₆ ⁺	O ₂	N ₂
T5-2	200806	29.80	9.80	11.10	1.590	4.52	0.80	0	0	1.90	40.58
	201511	22.38	4.22	4.06	0.47	0.68	0.05	0.12	0	5.65	62.37
T5-8	200806	60.20	11.25	13.30	1.58	4.70	0.84	1.11	0.30	1.67	5.09
	201511	53.47	8.83	7.72	0.79	1.09	0.06	0.15	0	2.46	25.43

4 结论

延长油田低温低渗透油藏实施空气泡沫驱见到了较好的效果,空气泡沫驱技术充分显示了“稳油、控水”的优势,同时形成了完整的注入工艺及安全保障措施。与水驱相比,实施空气泡沫驱后,单井产量升高、含水大幅度降低。区块单井月产油增加了2.2t,综合含水降低了25个百分点。虽然延长油田低温低渗油藏空气泡沫驱矿场实践见到了效果,降低氧含量保障了安全生产,但矿场依然存在空气压缩机长期稳定工作的问题,下步工作亟需提高设备长期工作的稳定性。

参考文献

- [1] 王成俊,洪玲,高瑞民,等.低渗透油藏提高采收率技术现状与挑战[J].非常规油气,2018,5(3):102-108.
WANG C J, HONG L, GAO R M, et al. Status-quo and challenges of enhanced oil recovery in low permeability reservoirs[J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(3): 102-108.
- [2] 王谦,石玉江,谭茂金,等.基于孔隙结构分类的致密砂岩含水率计算模型——以鄂尔多斯盆地陇东西部延长组长81储层为例[J].石油物探,2019,58(5):669-680.
WANG Q, SHI Y J, TAN M J, et al. Calculation model of water cut for tight sandstone based on pore structure classification: A case study from Chang 81 Reservoir in the Yanchang Formation in the Ordos Basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(5): 669-680.
- [3] 吉子翔,路存存,胡方芳,等.超低渗透油藏改善水驱效果技

术研究[J].石油化工应用,2018,47(9):59-63.

- [4] JI Z X, LU C C, HU F F, et al. Ultra-low permeability reservoirs to improve the effect of water flooding technology research[J]. Petrochemical Industry Application, 2018, 47(9): 59-63.
- [4] 张作安.低渗透油藏泡沫驱油机理及应用现状研究[J].当代化工,2017,46(8):1693-1695.
ZHANG Z A. Study on the mechanism and application of foam flooding in low permeability reservoirs[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(8): 1693-1695.
- [5] 邱隆伟,穆相骥,李浩,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系下石盒子组岩屑发育特征及其对储层物性的影响[J].石油与天然气地质,2019,40(1):24-33.
QIU L W, MU X J, LI H, et al. Characteristics of detritus development in the Permian lower Shihezi Formation in Hangjinqi area and its influence on reservoir physical properties [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 24-33.
- [6] 计秉玉,赵宇,宋考平,等.低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J].石油实验地质,2015,37(2):129-133.
JI B Y, ZHAO Y, SONG K P, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [7] 吴康军,刘洛夫,徐正建,等.鄂尔多斯盆地长7段致密油成藏物性下限研究[J].石油实验地质,2016,38(1):63-69.
WU K J, LIU L F, XU Z J, et al. Lower limits of pore throat radius, porosity and permeability for tight oil accumulations in the Chang-7 Member, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 63-69.
- [8] 庄永涛,刘鹏程,张婧瑶,等.大庆外围油田CO₂驱注采参数优化研究[J].钻采工艺,2014,37(1):42-46.
ZHUANG Y T, LIU P C, ZHANG J Y, et al. Optimization of injection and production parameters of CO₂ flooding in Daqing Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(1): 42-

- 46.
- [9] 朱红云,张津,吴淑艳,等.低渗透油藏气驱开发方式研究[J].非常规油气,2014,1(3):43-46.
ZHU H Y, ZHANG J, WU S Y, et al. Research on development regime by gas drive in low permeability reservoir[J]. Unconventional Oil&Gas, 2014, 1(3): 43-46.
- [10] 吴婷婷.低渗透致密油藏注水开发方式研究[D].成都:西南石油大学,2015.
WU T T. The study on low permeability tight reservoir waterflood development[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [11] 张冰,金志,白慧芳,等.低渗油藏空气泡沫驱提高采收率潜力评价新模型[J].非常规油气,2019,6(4):71-75.
ZHANG B, JIN Z, BAI H F. A new model for evaluating the recovery potential of air foam flooding in low permeability reservoirs[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(4): 71-75.
- [12] 吴海俊,付美龙,孙晶.FY油藏注空气原油氧化速率影响因素的研究[J].当代化工,2018,37(9):1896-1899.
WU H J, FU M L, SUN J. Study on influencing factors of oxidation rate of crude oil in FY reservoir[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(9): 1896-1899.
- [13] 吴张洪,张新春,杨兴利,等.长6致密油空气泡沫驱注入有效性地质因素研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(5):105-113.
ZHANG H, ZHANG X C, YANG X L, et al. Influence of geological factors on air foam flooding efficiency in a tight oil reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(5): 105-113.
- [14] 齐翊如.鄂尔多斯盆地甘谷驿油田长6低渗透砂岩油藏空气泡沫驱油机理研究[D].西安:西北大学,2017.
QI Y R. Air-foam flooding mechanism of Chang-6 oil reservoir with low permeability sandstone in Ganguyi region, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [15] 黄春霞,郭茂雷,余华贵,等.空气泡沫在非均质油藏中渗流能力的实验研究[J].岩性油气藏,2014,26(2):128-132.
HUANG C X, GUO M L, YU H G, et al. Experimental study on flow properties of air foam in heterogeneous reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(2): 128-132.

(编辑 黄颖)

(上接第70页)

- [8] 夏海帮,袁航,岑涛.彭水区块页岩气生产井排采方式研究与应用[J].石油钻探技术,2014,42(4):21-26.
XIA H B, YUAN H, CEN T. Study and application of drainage methods for shale gas wells in Pengshui Block[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 21-26.
- [9] 刘琦,蒋建勋,石庆,等.国内外排液采气方法应用效果分析[J].天然气勘探与开发,2006,29(3):51-55.
LIU Q, JIANG J X, SHI Q. Application analysis of methods of gas recovery by liquid unloading at home and abroad[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(3): 51-55.
- [10] 张宏录,程百利,张龙胜,等.页岩气井同心双管排采新工艺研究[J].石油钻探技术,2013,41(5):36-40.
ZHANG H L, CHENG B L, ZHANG L S, et al. New process of water drainage for shale gas recovery[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 36-40.
- [11] 杨桦,杨川东.优选管柱排水采气工艺的理论研究[J].西南石油学院学报,1994,16(4):56-65.
YANG H, YANG C D. Theoretical study on optimum selection string of water drainage and gas recovery[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 1994, 16(4): 56-65.
- [12] 王小彩,李敏,胡惠芳,等.优选管柱排液采气工艺技术[J].油气田地面工程,2003,22(6):26.
WANG X C, LI M, HU H F, et al. Optimization of water drainage and gas recovery string[J]. Oil- Gasfield Surface Engineering, 2003, 22(6): 26.
- [13] AGUILAR M A L, RAMOS H P, INESTROSA A R, et al. Self-sufficient system for continuous gas lift in a very harmful sour gas environment[C]// paper SPE-74414-MS presented at the SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico, 10-12 February 2002, Villahermosa, Mexico.
- [14] 汪海,鲍志强,耿新中,等.气井气举阀气举排液采气工艺参数设计研究[J].天然气勘探与开发,2005,28(2):36-38.
WANG H, BAO Z Q, LUAN Y C, et al. Parameter design of 'gas recovery by liquid drainage' technique with gas lift by gas-lift valve for gas wells[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2005, 28(2): 36-38.
- [15] 苏月琦,汪海,汪召华,等.气举阀气举排液采气工艺参数设计与优选技术研究[J].天然气工业,2006,26(3):104-106.
SU Y Q, WANG H, WANG Z H, et al. Design and optimization of technological parameters of gas production through GLV gas lift flowing back[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3): 104-106.

(编辑 尹淑容)