

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

杨红斌^{1,2}, 蒲春生^{1,2}, 吴飞鹏^{1,2}, 张新春³, 杨兴利³, 李星红³, 郑黎明^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 重质油国家重点实验室, 山东 青岛 266555; 3. 陕西延长油田股份有限公司, 陕西 延安 716000)

摘要:空气泡沫调驱技术综合了空气驱和泡沫驱的优点,可提高波及系数和驱油效率,在中高温油藏中取得了很好的应用效果,但是在浅层特低渗透低温油藏中的应用较少。根据陕北油区特低渗透油藏地质特征,以甘谷驿油田唐114井区为例,通过理论研究、室内实验和现场试验研究了空气泡沫调驱技术在浅层特低渗透低温油藏的适应性。结果表明:室内实验低渗透层中的原油被明显启动,驱油效率由水驱阶段的8.33%升高到50.55%;矿场试验井组含水率由98%下降至73%,产液量由3 m³/d降至0.8 m³/d,平均单井产油量由0.05 m³/d增至0.2 m³/d。空气泡沫调驱技术在甘谷驿油田具有较强的适应性,可大幅度提高油田采收率,对同类油藏的增油控水具有一定的借鉴作用。

关键词:空气泡沫调驱 浅层特低渗透油藏 低温 适应性 甘谷驿油田

中图分类号:TE357.42

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2012)06-0069-04

空气泡沫调驱技术可大幅度提高原油采收率。该技术将空气驱和泡沫驱有机结合,用泡沫作为调剖剂,空气作为驱油剂,既能大规模注入以提高地层压力,又能有效避免水窜和气窜,从而提高单井产油量、驱油效率以及采收率,成本很低,安全可靠,具有较强的应用价值,是具有良好发展前景的三次采油方法之一。在空气泡沫增油机理、泡沫体系优选、注入参数设计、注空气安全性评价、防腐蚀以及油藏数值模拟等方面都取得了大量的成果^[1-10],胜利油田、百色油田、中原油田等先后在中高温油藏实施了空气泡沫调驱,并取得了一定效果^[11-15]。但该技术在浅层特低渗透低温油藏中应用较少,根据陕北油区特低渗透油藏埋藏浅、温度低,非均质性严重,多发育微裂缝等地质特征,以甘谷驿油田唐114井区为例,结合前人的研究成果及室内物理模拟^[16-21],研究了空气泡沫调驱技术在特低渗透油藏中的适应性。室内研究与现场实践结果表明,空气泡沫调驱可驱替出低渗透层大量剩余油,增油控水效果显著。同时,对应采油井伴生气中氧气含量完全可控制在安全范围以内^[22],初步验证了该技术在浅层特低渗透低温油藏中的可行性,是该类油藏提高采收率的一种行之有效的新方法,

可为同类油藏增油控水提供借鉴。

1 浅层特低渗透低温油藏空气泡沫调驱机理

提高油藏波及体积 在非均质特低渗透油藏中,泡沫液首先进入裂缝等高渗透层改善驱替液与原油的流度比,随着后续气体的注入,产生贾敏效应,随着泡沫液的注入,高渗透层中的流动阻力逐渐增大,泡沫液可依次进入水驱不能进入的低渗透层,抑制粘性指进,调整层间关系,改善注入剖面,从而提高纵向波及体积。泡沫液堵塞高渗透层窜流通道,后续注入泡沫液必然流向波及状况较差的其他方向,通过液流转向可扩大平面波及效率。泡沫的贾敏效应对空气具有较强的封窜作用,可延长空气在地层中的滞留时间,延迟空气突破,使空气能更好地发挥作用。

在油藏孔隙介质中,气体渗流阻力远小于泡沫液渗流阻力,注入空气可进入泡沫液波及不到的低渗透层,特别是在不同沉积条件连通部位,可将这些未动用、难以开采部位剩余油驱扫出来,提高油层波及体积。泡沫液中的泡沫破裂以后由于重力

收稿日期:2012-09-25。

作者简介:杨红斌,男,在读硕士研究生,从事复杂油气藏高效强化开采技术研究。联系电话:18653250252, E-mail: yhb0810@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“低渗透油藏大功率谐振波—化学驱复合技术”(2011ZX05009-004),山东省自然科学基金“稠油热波耦合辅助层内化学催化裂解降粘技术研究”(ZR2010EM014)。

分异作用,空气聚集在油层顶部,同样可驱扫低渗透层顶部剩余油,提高波及体积。

提高油藏驱油效率 在高渗透层,泡沫液优先进入,在长期水驱下含油饱和度较低,泡沫液稳定,可大幅度降低流体流度,增大流动阻力,后续驱替液可通过剥离油膜作用剥落岩壁上的油膜,驱出小孔隙中的剩余油,提高该层段驱油效率。

在低渗透层,由于水洗状况较差,含油饱和度较高,因而泡沫液在该层段稳定性较差,但该层段具有泡沫液与气体交替驱的双重特征,泡沫液中的起泡剂可大大降低油水界面张力,改善岩石表面润湿性,因此在该层实施空气泡沫调驱具有比水驱更高的驱油效率。

低温氧化驱油 油藏中原油可与泡沫破裂后释放出的氧气发生低温氧化(LTO)反应,消耗氧气产生碳的氧化物,反应释放热量可加热油层,产生热效应,促使轻质组分挥发,形成烟道气驱,在适当压力下烟道气可与原油之间形成混相驱,可提高油藏地层能量及原油采收率^[23]。

2 试验区概况

唐114井区是甘谷驿油田近年来发现的一个新区块,为典型的浅层特低渗透低温油藏。空气泡沫调驱试验区是唐114井区的一个主要区块。油层埋深为400~500 m,长6油层组温度为24.6~27.5℃,平均渗透率为 $0.85 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔隙度为8.3%,平均地面原油密度为 0.826 g/cm^3 ,50℃下平均原油粘度为 $3.26 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,凝固点平均为2.8℃,平均含硫量为0.104%,初馏点平均为72.5℃,原油体积系数为1.036,含盐量变化较大,为11~202 mg/L,原始地层压力为4.016~5.812 MPa,饱和压力为1.12 MPa。

试验区经过多年的开发,部分油井已进入高含水期。开发特点符合低渗透油藏的基本开采规律,可采储量采出程度低,剩余油分布零散,截至2011年5月,油井共有17口,其中3口因高含水关井,日产液水平较低,平均单井产液量为 $0.68 \text{ m}^3/\text{d}$,单井产油量为 0.208 t/d ,平均含水率为37%(其中7口井含水率大于70%);水井共8口,其中开井8口,注入压力为7.8 MPa,平均单井注入量为 $1.93 \text{ m}^3/\text{d}$,累积注入量为 $7\,839 \text{ m}^3$,累积采液量为 $7\,850 \text{ m}^3$;采出程度为1.76%,累积注采比为1。试验区探明含油面积为 0.5 km^2 ,石油地质储量为 $19.18 \times 10^4 \text{ t}$,标定可采储量为 $3.458 \times 10^4 \text{ t}$,采收率为18.03%。

该区采用超前注水方式开发,开发井网为矩形反九点井网,随着水驱的开发,部分油水井之间已出现微裂缝和高渗透通道。该区纵向致密油层与油水同层、干油层交替出现,水上分流河道、河道侧翼与沉积间湾交替出现。剩余油纵向上主要分布在长6油层组的中下段以及沉积单元发育较差部位,在平面上主要分布在主流线两翼。

试验区4口水井曾做过深部调驱试验,取得了一定的效果,但有效期太短,几个月后随着水驱开发,裂缝重新张启,油井含水率重新升高,产油量下降,急需一种合适的调驱方式,以持续有效地封堵微裂缝以及高渗透通道。

3 空气泡沫调驱技术可行性分析

3.1 试验区应用条件的可行性

采出程度低且存在大量剩余油 截至2011年5月,试验区累积产油量为 $0.337\,5 \times 10^4 \text{ t}$,采出程度仅为1.76%,地层内尚有大量剩余油未采出,为空气泡沫调驱应用提供了前提条件。从剩余油分布方面考虑,提高采收率要从提高平面和纵向波及系数入手,而流度比是影响平面和纵向波及系数的主要影响因素。水油流度比与平面和纵向波及系数呈反比。空气泡沫调驱既可降低水油流度比,提高波及系数,又可提高驱油效率。当泡沫干度在一定范围时,其粘度远高于基液粘度,改善了水油流度比,提高了波及系数;起泡剂进入地层后,不消泡时其粘度不变,消泡后粘度降低,起到“堵水不堵油”作用,因而在高渗透层粘度大,低渗透层粘度小,起到“堵大不堵小”作用,增大洗油能力,提高驱油效率。

产气量极少且伴生气中氧气含量低 根据统计资料,唐114井区长6油层生产气油比低,仅为 $11.2 \text{ m}^3/\text{t}$,因此产气量少,对安全、有效地开展空气泡沫调驱技术是有利的。此外,室内注空气低温动态氧化实验结果以及伴生气多组分爆炸极限计算表明,唐114井区油样氧化活性不强,但长时间及长距离接触,仍可消耗掉大量氧气,该区伴生气临界氧含量为11.42%;根据现场施工过程中取样测试,试验区油井伴生气氧含量远低于安全范围。

油层厚度大 对于空气泡沫调驱来说,一般要求油层厚度大于3 m,才能更好地发挥其作用。对于厚油层,在水驱开发过程中,一般底部油层的油已被驱出,形成高渗透通道,甚至造成底部水淹,此时空气泡沫调驱可充分发挥其优势,由于重力分异作用,引起气体或泡沫向油层顶部运移,水向底部

运动,可在油层顶部形成一个气油流动带,聚集的气体驱替出水驱无法采出的剩余油,提高了顶部油层的动用程度。唐114井区长6油层厚度一般为15 m左右,符合要求。

油层埋藏浅 注气设备是影响空气泡沫调驱和气驱现场施工的重要因素,目前国产空气压缩机一般只能满足小于20 MPa的注气要求,且一般要求在10 MPa左右运行,长时间的高压运行,对设备损耗很大,但是过小的注入压力会导致注入速度减慢,影响泡沫液地下起泡,进而影响调驱效果。因此要求注入目的层不能过深,唐114井区长6油层大多位于400~470 m,满足注入压力的要求;一般情况下在注入速度为30 Nm³/h的情况下,注入压力为13 MPa左右,可以满足压缩机施工要求。

非均质性严重 一般情况下,空气泡沫调驱可提高采收率约10%~25%,泡沫在多孔介质中具有很高的视粘度(表观粘度),视粘度随介质孔隙度的增大而升高。泡沫是假塑性流体,粘度随剪切应力的升高而降低,介质的孔道越大则流速越慢,剪切应力越小,视粘度越大。泡沫的这种特性很适合非均质油层驱油,因此油层非均质性越严重,对空气泡沫调驱越有利。

唐114井区长6油层砂体呈带状展布,其在横向上具有较强的非均质性,表现在砂岩厚度、砂/地比值以及储层物性均变化较大。此外试验区多发育微裂缝,加剧了油层的非均质性。

部分水井进行过深部调剖试验 试验区中的4口水井曾于2010年9月进行过深部调剖试验,主要调剖剂是聚合物和无机凝胶,取得了一定的效果,但是有效期较短,地层孔隙壁上残留了一些凝胶和聚合物,对后续泡沫调驱可起到一定的补充作用,能够减少聚合物在地层运移过程中的消耗,并更快地堵塞大孔道,真正快速达到使液流转向的作用。

注空气安全性分析 唐114井区地层温度较低、渗透率较低。温度低导致氧化速度慢,而渗透率低则注入速度低,在地层中滞留时间较长,加之唐114井区溶解气油比低于中外其他注空气油田,利于现场施工中的安全控制。

3.2 室内物理模拟可行性

3.2.1 不同剩余油饱和度下封堵效率

实验用岩心渗透率约为 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,先饱和试验区脱水原油,然后水驱油至一定的岩心含油饱和度,剩余油饱和度分别为0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%和60%,将高渗透单管模型放入50℃恒温箱中进行封堵实验,实验用泡沫液体系为0.5%

BK6A+0.15%BK6B,注入方式为泡沫液与空气交替注入,交替段塞为0.5倍孔隙体积,气液比为3:1。

在剩余油饱和度分别为0, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%和60%时,空气泡沫阻力因子分别为50.2, 42.6, 29.8, 19.2, 18.8, 18.3和17.6,可以看出空气泡沫在无油岩样中的阻力因子最大,随着剩余油饱和度的增大阻力因子逐渐减小;当剩余油饱和度大于30%时,阻力因子变化缓慢;当剩余油饱和度为60%时,与无油时相比阻力因子下降幅度达65%。由此可知,当剩余油饱和度低于20%时,泡沫液体系能够很好地发挥作用,堵塞高渗透层,而含油饱和度高于20%时,泡沫液体系明显受到原油消泡作用的限制,不能很好地起到堵塞作用。唐114试验区裂缝发育,经过长期注水开发,主流通道内剩余油饱和度已较低,因此适于空气泡沫封堵。

3.2.2 不同渗透率下双管驱油效率

在单管模型的基础上建立双管模型,该模型由高、低渗透率2个单管并联而成,模拟油藏非均质特征,用裂缝性岩心模拟高渗透层,其渗透率为 $49.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;用填砂管模拟低渗透层,其渗透率为 $9.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;渗透率级差为5.5。实验所用药品和仪器与单管驱替装置相同。实验过程中在50℃水驱含水率至80%之后,实施空气泡沫调驱。双管驱油效率表明,在水驱阶段,高、低渗透层的驱油效率分别为25.12%和8.33%,两者相差3倍,由此可见水驱阶段原油大部分来自高渗透层。

高、低渗透层的最终驱油效率分别为45.12%和50.55%(图1)。改注空气泡沫调驱之后,低渗透层中的原油被明显动用,驱油效率由水驱阶段的8.33%升高到50.55%,高渗透层升高较少,说明空气泡沫调驱阶段驱替出大量低渗透层中的原油,这也验证了空气泡沫调驱技术在低渗透油藏中的适应性。

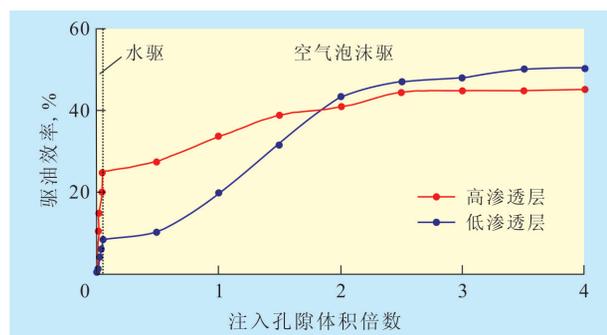


图1 空气泡沫调驱双管驱油效率实验结果

4 现场应用

2011年10月1日,对试验区A井组进行了空气

泡沫调驱现场试验。先注入前置液段塞 82.9 m^3 , 再采用地面泡沫液段塞和空气段塞交替注入, 地下产生泡沫的注入方式。现场施工中注 1 d 泡沫液注 1 d 空气的小段塞, 累积泡沫液注入量为 281.58 m^3 , 累积空气注入量为 $37\ 817.8 \text{ Nm}^3$ (折合地下体积为 $1\ 037.936 \text{ m}^3$), 累积气液比为 2.69:1。

由试验区调驱前后的生产变化(图2)可见, 井组含水率由 98% 下降至 73%, 平均单井产油量由 $0.05 \text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $0.2 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据试验效果统计, 产液量由 $3 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至 $0.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。说明空气泡沫有效封堵了高渗透层, 提高了波及体积, 注入压力由调驱前的 5 MPa 调整为截至 2011 年 12 月 19 日的 7 MPa, 生产井伴生气氧含量均在安全范围之内, 试验井组整体含水呈下降趋势, 产液量有所下降, 产油量逐渐增加。由于空气泡沫综合调驱的有效期将长达半年以上, 因此随着时间的延长增油控水效果会更加明显。

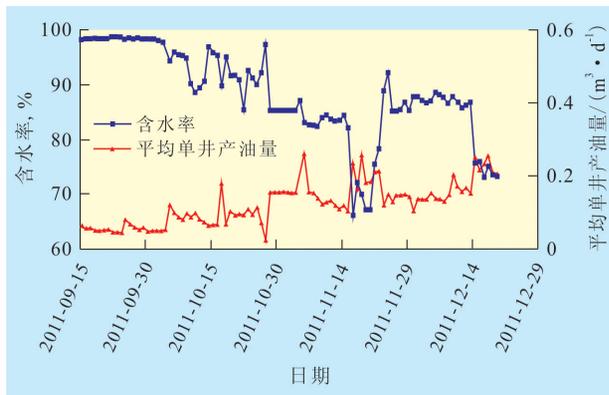


图2 空气泡沫调驱试验井组调驱前后生产变化

5 结束语

根据陕北油区特低渗透油藏储层特征并结合室内模拟, 初步验证空气泡沫调驱技术在甘谷驿油田唐 114 井区浅层特低渗透低温油藏中具有良好的适应性和可行性。空气泡沫调驱矿场试验井组含水率由 98% 下降至 73%, 产液量由 $3 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至 $0.8 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均单井产油量由 $0.05 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加至 $0.2 \text{ m}^3/\text{d}$, 对应采油井伴生气中氧气含量完全可以控制在安全范围以内, 达到了封窜与增油控水的目的, 对同类油藏的增油控水具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 于洪敏, 任邵然, 王杰祥, 等. 胜利油田注空气提高采收率数值研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(3): 105-109.
- [2] 侯永利, 李翔, 张云宝, 等. 渤海油田氮气泡沫与水交替注入提

高采收率室内实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 56-58.

- [3] 王杰祥, 张琪, 李爱山, 等. 注空气驱油室内实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 73-75.
- [4] Watts B C, Hall T F, Petri D J. The Horse Creek air injection project: An overview[R]. SPE 38359, 1997.
- [5] 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.
- [6] Ren S R, Greaves M, Rathbone R R. Air injection LTO progress: An IOR technique for light-oil reservoirs[J]. SPE Journal, 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] 张广卿, 刘伟, 李敬, 等. 泡沫封堵能力影响因素实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 44-46.
- [9] 杨宝泉, 任邵然, 于洪敏, 等. 轻质油藏注空气低温氧化机理数值模拟[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(3): 358-361.
- [10] 李兆敏, 刘伟, 李松岩, 等. 多相泡沫体系深部调剖实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1): 55-58.
- [11] 任邵然, 于洪敏, 左景栾, 等. 中原油田空气泡沫驱提高采收率技术[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 414-416.
- [12] 翁高富. 百色油田上法灰岩油藏空气泡沫驱油先导性实验[J]. 油气地质与采收率, 1998, 5(1): 6-10.
- [13] 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.
- [14] 梁于文, 熊运斌, 高海涛, 等. 强非均质性油藏空气泡沫调驱先导试验——以胡状集油田胡 12 断块为例[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 69-71.
- [15] 王杰祥, 李娜, 孙红国, 等. 非均质油层空气泡沫驱提高采收率试验研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(2): 4-6.
- [16] 宋渊娟, 许耀波, 曹晶, 等. 低渗透油藏空气泡沫复合驱油室内试验研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(5): 79-81.
- [17] 李孟涛. 低渗透油田注气驱油实验和渗流机理研究[D]. 廊坊: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2006.
- [18] 孟令君. 低渗透油藏空气/空气泡沫驱提高采收率技术实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- [19] 庞雯, 郭德运, 赵靖舟, 等. 甘谷驿油田延长组长 6 油层沉积特征[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2004, 34(4): 465-468.
- [20] 郭德运, 赵靖舟, 王延玲, 等. 鄂尔多斯盆地甘谷驿油田上三叠统长 6 油层组孔喉结构特征及其影响因素[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(1): 25-28.
- [21] 闫凤平, 杨兴利, 张建成, 等. 空气、泡沫驱提高特低渗透油田采收率效果分析[J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 58-60.
- [22] 吕鑫, 岳湘安, 吴永超, 等. 空气泡沫驱提高采收率技术的安全性分析[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(5): 44-46.
- [23] 张旭, 刘健仪, 孙良田, 等. 注空气低温氧化提高轻质油气藏采收率研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(4): 78-80.