

文章编号:1009-9603(2019)03-0085-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.03.011

浅层边水断块油藏氮气复合吞吐实验

赵凤兰^{1,2,3}, 宋黎光^{1,2,3}, 侯吉瑞^{1,2,3}, 李文峰^{1,2,3}, 王 鹏^{1,2,3}, 郝宏达^{1,2,3}

(1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油三次采油重点实验室 低渗油田提高采收率应用基础理论研究室, 北京 102249; 3. 北京市重点实验室温室气体封存与石油开采利用, 北京 102249)

摘要:浅层边水断块油藏由于含油面积小、非均质性强、黏度高以及开发过程中存在边水突进快等问题,氮气吞吐可有效补充地层能量,具有控抑边水突进的潜力。通过采用高温高压边水径向流模型对氮气、氮气-表面活性剂和氮气-二氧化碳3种吞吐介质控水增油可行性进行室内实验研究,以吞吐阶段含水率最大降低值、控水持续时间和采收率提高程度为指标,并结合模型压力变化对3种吞吐介质控水增油效果进行评价和对比,并在此基础上分别分析3种吞吐介质控水增油机理。结果表明,3种吞吐介质均能控抑边水;氮气吞吐控抑边水能力最强,但氮气的驱油效率低,增油效果较差;而氮气复合吞吐在实现控抑边水的基础上,通过表面活性剂和二氧化碳提高了驱油效率,增油效果优于氮气吞吐。

关键词:浅层边水断块油藏;氮气吞吐;复合吞吐;控抑边水;增油效果

中图分类号:TE357.46+3

文献标识码:A

Experiment of nitrogen compound huff and puff for fault-block reservoirs with shallow edge water

ZHAO Fenglan^{1,2,3}, SONG Liguang^{1,2,3}, HOU Jirui^{1,2,3}, LI Wenfeng^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2,3}, HAO Hongda^{1,2,3}

(1. China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Basic Theory Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Low-permeability Oil Field, Tertiary Oil Recovery Key Laboratory, PetroChina, Beijing City, 102249, China; 3. Key Laboratory of Greenhouse Gas Sequestration and Petroleum Exploitation, Beijing City, 102249, China)

Abstract: The strong heterogeneity and high viscosity of crude oil in shallow fault-block reservoirs with small oil content lead to a rapid edge water coning problem during the production. The N₂ huff and puff has the potential of controlling edge water coning since the N₂ can supply the power of the reservoir. Therefore, the feasibility of N₂/N₂-surfactant/N₂-CO₂ huff and puff for controlling the edge water coning and enhancing oil recovery was studied in laboratory by the radial flow model with edge water at high temperature and high pressure. The factors including maximum reduction of water cut, water control duration, and increase of oil recovery were selected to evaluate and compare the effect of controlling the water coning and improving oil production and to analyze the mechanism of controlling edge water coning and improving oil production at different pressures. The results show that: N₂/N₂-surfactant/N₂-CO₂ huff and puff all have the ability of controlling edge water coning; the N₂ huff and puff has the best ability of controlling water coning, but has the least ability of improving oil production with a low displacement efficiency; the N₂ compound huff and puff has the ability of controlling edge water coning, and has the better ability of improving oil production than N₂ huff and puff with the surfactant and CO₂ to improve the oil displacement efficiency.

Key words: shallow fault-block reservoir with edge water; N₂ huff and puff; compound huff and puff; controlling edge water coning; effect of improving oil production

收稿日期:2019-03-19。

作者简介:赵凤兰(1973—),女,山东商河人,副教授,博士,从事提高采收率与采油化学相关的科研和教学工作。联系电话:13683639583, E-mail:zhfl@cup.edu.cn。

通信作者:宋黎光(1995—),男,安徽亳州人,在读硕士研究生。联系电话:17710800116, E-mail:s18341329948@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“低渗致密油藏高效提高采收率新技术”(2016ZX05009-004)和“海外重点油气田开发钻采关键技术”(2017ZX05032-004)。

“十三五”油气资源开发受油价低的影响,油藏开发方式受限于经济适用性^[1]。浅层边水断块油藏由于含油面积小,非均质性强,且存在强边水能量,难以进行合理有效地开发。注气进行吞吐开发可充分补充地层能量,以实现油藏的持续有效开发。吞吐开发只能开采注入井附近区域的原油,具有单井吞吐开发规模小,经济效益高的特点,对于开发断块油藏具有适应性^[2]。注氮气、二氧化碳等气体进行吞吐作业可明显提高油藏采收率^[3-9]。二氧化碳在与原油的接触过程中,会与原油发生传质、溶解降黏等作用^[10],改善原油性质,因此二氧化碳吞吐开发具有较高的提高采收率效果。与二氧化碳相比,氮气具有良好的膨胀性能,将其注入天然能量低的非常规油藏进行吞吐开发,可持续补充地层能量,延缓产量的递减速度^[11],对于抑制天然能量的推进具有较好的效果^[12],且来源广、价格低,开发成本低;但与原油的相互作用能力较弱,驱油效率低,因此复合吞吐开发效益更高。对浅层边水断块油藏进行氮气复合吞吐开发,具有控抑边水、增加原油产量的潜力。目前,有关氮气吞吐的研究较为深入,孙永鹏等研究了低渗油藏单井氮气吞吐的影响因素,确定了周期注入量和井底流压是影响周期采出程度的重要因素^[13];张国强等通过数值模拟研究,分析了氮气吞吐相比于二氧化碳吞吐更适合ZY小断块油藏^[14];李亮等研究了底水油藏高含水水平井氮气吞吐实验,分析了氮气吞吐的注入时机和影响氮气吞吐效果的参数^[15];但有关浅层边水断块油藏氮气吞吐及其复合吞吐开发效果方面的研究相对较少。为此,笔者利用自行研制的边水径向流物理模型,研究氮气吞吐及其复合吞吐在储层非均质和原油较高黏度条件下开发浅层边水断块油藏的可行性,并对比分析3种吞吐介质作用下的控抑边水效果及增油效果,以期为边水油藏吞吐开发提供理论支持。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验仪器主要包括KDHW-II型自控恒温箱、HAS-100HSB型恒压恒速泵、高温高压径向流岩心夹持器、活塞中间容器、回压阀、压差变送器及数据采集系统、气液分离装置、液体收集装置和管线若干。

实验用油为由浅层油藏脱气原油与煤油复配而成的模拟油,黏度为94 mPa·s(实验温度为65℃,

剪切速率为7.34 s⁻¹)。

实验用水为总矿化度为1 572 mg/L的浅层油藏模拟地层水,Na⁺,K⁺,Ca²⁺,Mg²⁺,Cl⁻,HCO₃⁻,SO₄²⁻和CO₃²⁻质量浓度分别为473,473,37,37,413,548,88和25 mg/L,水型为NaHCO₃型。

实验用气包括纯度均为99.9%的氮气和二氧化碳。

实验用剂为起泡剂EC-1(阴离子型)。

1.2 实验模型设计

实验所用边水径向流模型(图1)为石英砂压制的人造层内非均质岩心,直径为40 cm,厚度为4.5 cm,分为上、下2层,呈正韵律分布,渗透率为500 mD/1 000 mD(级差为2)。岩心上分布5口模拟井,均位于高渗透层中部,井5处于模型中心,其他井围绕井5等距分布在同心圆上。井1为注入井,井3为采出井,其他3口井用于压力监测,井1向岩心中注地层水模拟边水驱的天然能量开采阶段,井3注氮气及复合介质模拟吞吐过程。

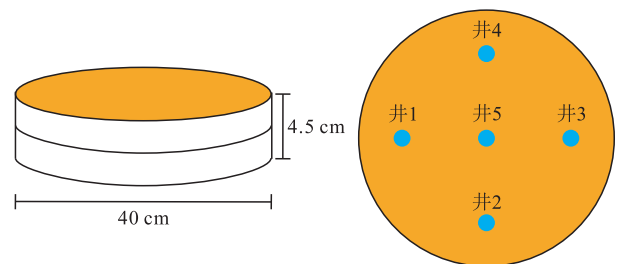


图1 边水径向流模型

Fig.1 Radial flow model with edge water

1.3 实验方法及步骤

实验方法主要为选取满足尺寸要求的人造层内非均质岩心,先通过边水驱替至出口端含水率为98%,向岩心注入各吞吐介质,记录吞吐过程中各点压力变化及出口端含水率变化,分析各吞吐过程中的边水控抑及增油效果。

实验步骤主要包括:①准备工作。打磨模型使表面平整,计算模型视体积;模型表面涂防腐层,干燥;将径向流岩心模型准确放置于径向流岩心夹持器内,加围压和轴压;用真空泵将岩心抽真空8 h以上,岩心饱和模拟地层水,计算岩心孔隙体积;将径向流岩心夹持器放置在实验温度为65℃的恒温箱内,用恒速泵低流速(0.1 mL/min)驱替模拟地层水饱和模拟油,计算含油饱和度,饱和后的模拟油在恒温箱内老化48 h。各组实验岩心参数如表1所示。②井1以恒定流速(1 mL/min)注入地层水,井3连通回压阀控制井底流压为5 MPa,边水驱替至井3含水率为98%后,井1停注,井3停采,并记录不同

时间的产液量、产油量和产水量;井1—井5均连通压力传感器,自动采集记录各井点压力变化。③向井3注入吞吐介质(氮气吞吐实验注入0.2 PV的氮气;氮气-表面活性剂复合吞吐实验段塞式间歇注入0.05 PV表面活性剂、0.05 PV氮气、0.05 PV表面活性剂、0.05 PV氮气;氮气-二氧化碳复合吞吐实验注入0.2 PV物质的量比为1:1的氮气和二氧化碳的复合气)。④注入吞吐介质后,闷井12 h,保证各井点压力不发生变化为止。⑤闷井结束后,井1以恒定流速(1 mL/min)注入模拟地层水进行吞吐和后续边水驱替,井3连通回压阀开井采液至含水率为98%,记录该阶段的产液量、产油量和产水量。⑥更换岩心及吞吐介质,进行下一组吞吐实验,重复步骤②—⑤。

表1 实验所用岩心基础参数

Table1 Basic parameters of experimental cores

岩心编号	吞吐介质	渗透率 (mD)	孔隙体积 (mL)	孔隙度 (%)	饱和油体积 (mL)	含油饱和度 (%)
1	氮气	500/1 000	1 326	24.54	926.5	69.87
2	氮气+表面活性剂	500/1 000	1 296	23.98	966.0	74.54
3	氮气+二氧化碳	500/1 000	1 331	24.63	1 000	75.13

2 实验结果与分析

2.1 氮气吞吐实验

可将氮气吞吐实验整个过程划分为边水驱替、氮气注入+闷井、“吐”+边水驱3个阶段(图2)。

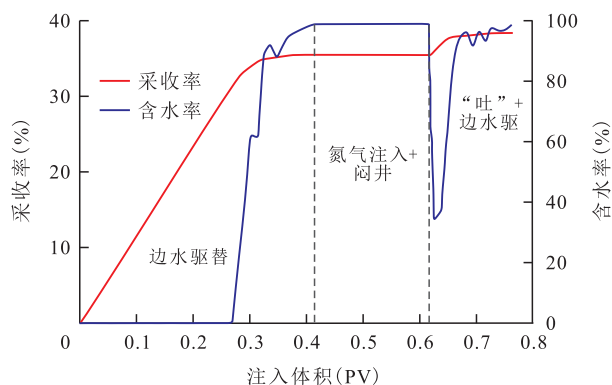


图2 氮气吞吐提高采收率和控抑边水效果

Fig2 Results of enhancing oil recovery and controlling edge water coning with N₂ huff and puff

2.1.1 控水增油效果

从图2可以看出,在边水驱替阶段,当边水注入体积较小时,出口端含水率为0,即无水产油阶段,此阶段注入体积约为0~0.3 PV。无水产油阶段是边水驱替阶段采收率贡献最大的阶段,此时由于岩心中含油饱和度较高,边水均匀地将处于大孔隙中的

油驱向出口端,产出井持续产油。注入0.3 PV之后,出口端见水,且含水率在较短时间(约为1.1 h,孔隙体积为1 326 mL,以注入速率1 mL/min注入0.05 PV)内迅速由0上升至90%,这一阶段为含水率迅速上升阶段。含水率的快速上升与边水驱的特点有关,边水驱是典型的面驱替,即水驱前缘近乎处于同一平面,当水驱前缘到达出口端时,边水突破,注入的边水将直接被采出井产出,形成无效驱替。含水率的快速上升还与水油流度比直接相关,原油黏度过大(该实验条件下的原油黏度为94 mPa·s,水油流度比达到100),水驱前缘不稳定,且注入水沿大孔隙形成指进,其他小孔隙未被水波及到,造成水驱波及体积较低,采收率下降。在这一阶段采收率基本没有增加,因此在边水油藏开发中应采取措施尽量避免边水过早突破。

当含水率上升至较高后,随着边水驱的进行,含水率增加速度减缓,由90%回升至98%需要较长时间(约持续了2.2 h,孔隙体积为1 326 mL,模拟地层水以注入速率1 mL/min注入了0.1 PV),为含水率缓慢上升阶段。虽然还有原油产出,但只是水流通道的形成后,水持续冲刷通道内岩石壁面油膜而剥离下来的部分原油。另外其他小孔隙内,孔径较小,毛管压力较大,从而阻碍水的快速推进,也会产出少量原油,延缓含水率的上升。

边水驱经过3个阶段后,出口端含水率达到98%,累积产油量为335.8 mL,采收率为36.24%。吞吐阶段,产出井压力降低,氮气膨胀抑制边水的推进,出口端含水率下降至33.8%,随后很快上升至较高含水率维持一段时间后回升至98%。将吞吐阶段含水率从最低值回升至98%过程的持续时间定义为控水持续时间,氮气控水持续时间约为3.3 h(孔隙体积为1 326 mL,以注入速率1 mL/min注入了0.15 PV的边水),氮气吞吐及边水驱替共同作用阶段累积增油量为27.2 mL,采收率增加2.9%,增加幅度不明显,原因在于氮气在原油中的溶解度低,降低原油黏度有限,对近井地带的洗油效果差。

2.1.2 压力变化

从氮气吞吐过程各井点压力变化曲线(图3)可以看出,在注氮气过程中,各井点压力持续上升,其原因为氮气在模型压力和温度下,在原油中的溶解度较低,随着注入量的增加,未溶于原油中的氮气由于具有良好的膨胀性,使模型压力持续升高。模型压力增加速率随氮气注入量的增加逐渐增大,且最终增加至9 MPa。

注气结束后,关闭井3,进入闷井阶段。吞吐介

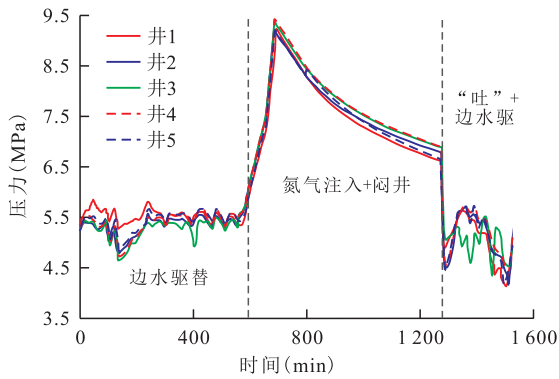


图3 氮气吞吐过程中各井点压力变化曲线

Fig.3 Pressure change curves for well points in N₂ huff and puff

质充分与原油接触,膨胀原油,降低黏度,并向远井地带运移。在闷井期间,由于氮气的不断溶解和向远井地带的运移,各点地层压力逐渐下降。由于氮气在原油中溶解度和地层中的运移距离有限,后续溶解量减少,各井点压力下降幅度趋于平缓,至开井采液前由9 MPa降至6.7 MPa。

闷井结束后,井3开井采液,井1注模拟地层水,在开井“吐”及边水驱共同作用下,开井瞬间,由于模型压力高于回压(5 MPa),氮气携带部分原油喷出。同时由于压力降低,氮气发生膨胀、部分溶解气析出,产生贾敏效应,对已形成的边水流动通道产生阻力,抑制边水的推进,并迫使边水向小孔道波及,这种对边水的控抑效果体现在井2、井4和井5压力上升(图3)以及含水率下降(图2)。开井采液后,井2、井4和井5压力明显上升,井5从5 MPa上升至5.7 MPa,对应图2中的含水率快速下降,由98%下降至33.8%,表明氮气控抑边水效果明显。在边水驱替大约100 min(0.1 PV)时,由于吞吐气体能量的消耗,氮气控抑边水的效果减弱,井2、井4和井5压力回落,对应图2中含水率的上升,最后各点压力与回压平衡。

2.2 氮气-表面活性剂复合吞吐实验

在纯氮气吞吐实验的基础上,考虑到氮气吞吐增油效果差的问题,设想氮气-表面活性剂复合吞吐,采用段塞式注入,利用氮气的膨胀特性将表面活性剂运送至远井地带,以期获得比氮气吞吐更高的采收率。

2.2.1 控水增油效果

该实验结果(图4)中边水驱替阶段,依靠边水能量驱替至出口端含水率达到98%,该阶段累积产油量为346.2 mL,采收率为35.84%。

吞吐阶段,由于表面活性剂的洗油作用,开井瞬间含水率由98%下降至27.8%,含水率下降幅度明显。随后含水率处于较高值一段时间后回升至

98%,控水持续时间约为3.24 h(孔隙体积为1 296 mL,以注入速率1 mL/min注入0.15 PV的边水),氮气-表面活性剂复合吞吐对边水有较好的控抑效果。吞吐阶段累积增油量为32.6 mL,提高采收率3.37%,相比于纯氮气吞吐,采收率有所提高,原因在于表面活性剂有效地增加了近井地带的洗油效率。

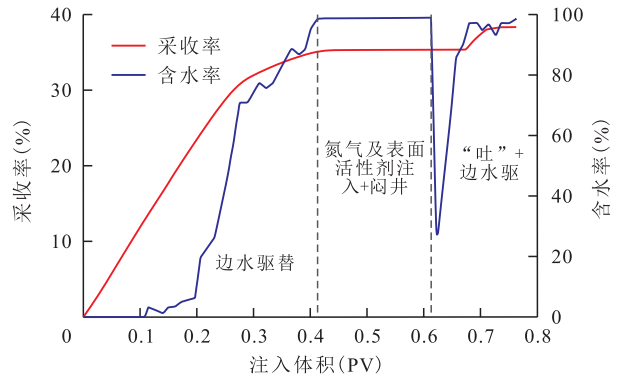


图4 氮气-表面活性剂复合吞吐提高采收率及控抑边水效果

Fig.4 Results of enhancing oil recovery and controlling edge water coning with N₂ and surfactant compound huff and puff

2.2.2 压力变化

从吞吐过程各井点压力变化(图5)可以看出,在注入吞吐介质阶段,先注入0.05 PV的表面活性剂,各井点压力明显上升,随后注入0.05 PV的氮气,氮气能部分溶解在原油中,并且具有良好的压缩性,因而氮气的注入减缓了模型压力的上升幅度,继续注表面活性剂,模型压力以更大幅度上升,最后再注入氮气段塞,原油对氮气的溶解量下降,模型压力下降幅度低于前一个氮气段塞。吞吐介质注入完成后,模型压力上升至约为9 MPa。

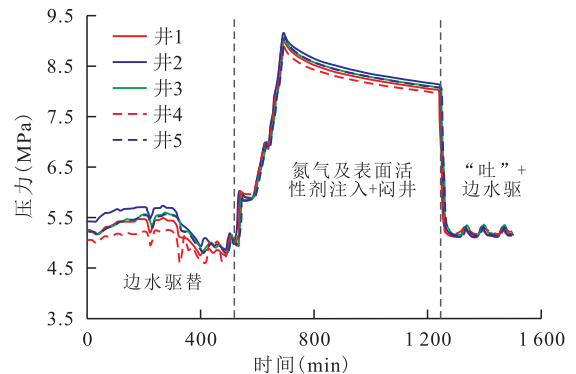


图5 氮气-表面活性剂复合吞吐过程中各井点压力变化曲线

Fig.5 Pressure change curves for well points during N₂ and surfactant compound huff and puff

闷井过程中,相比纯氮气吞吐闷井过程,可能是注入的表面活性剂在油水界面上吸附,阻碍了氮

气与原油的相互接触,促使整个闷井过程中各井点压力下降幅度缓慢,在相同的闷井时间下,开井生产前各井点压力仅下降至约为7.9 MPa。

闷井结束后,由于吞吐介质的段塞注入,吞吐过程呈现段塞特征。压力上升段为氮气的膨胀作用,控抑边水的推进,由于氮气注入量较少,压力上升幅度不大,仅由5 MPa上升至5.3 MPa,对边水的控抑效果不强,压力平缓段表现为表面活性剂作用效果,降低油水界面张力,提高近井地带洗油效率。

2.3 氮气-二氧化碳复合吞吐实验

由于二氧化碳在原油中的溶解性好,对原油具有良好的膨胀性,二氧化碳溶于原油后可显著降低原油黏度(该实验所用原油在压力为18.23 MPa,温度为65℃时,溶解二氧化碳后,黏度由94 mPa·s降至20 mPa·s,降黏率达79%),降低油水界面张力,且二氧化碳在水中的溶解可改善油水流量比,因此,考虑氮气-二氧化碳复合吞吐是否有利于提高氮气控抑边水效果和增油效果。

2.3.1 控水增油效果

从氮气-二氧化碳复合吞吐提高采收率及控抑边水效果(图6)可以看出,边水驱替至含水率98%时,累积采油量为345.8 mL,采收率为34.58%。

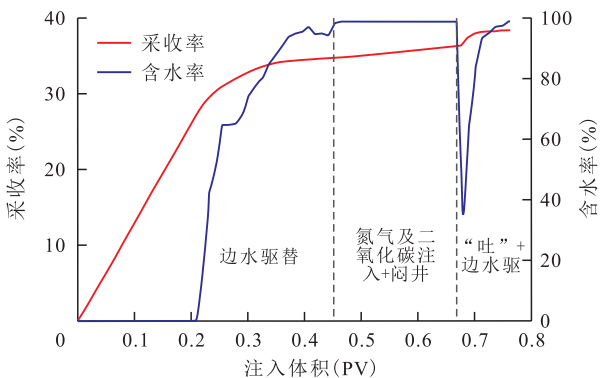


图6 氮气-二氧化碳复合吞吐提高采收率及控抑边水效果
Fig.6 Results of enhancing oil recovery and controlling edge water coning with N₂ and CO₂ compound huff and puff

吞吐阶段,由于二氧化碳充分与近井地带的原油接触,原油黏度大幅度降低,加上复合气的膨胀作用,产油量增加,含水率由98%下降至36.5%。随着地层压力的不断降低,部分溶解的二氧化碳从原油中析出,产生贾敏效应,对边水推进有一定的阻碍作用,且二氧化碳在水中的溶解改善了油水流量比,因而后续的边水驱替过程含水率上升幅度较小。复合气吞吐阶段,控水持续时间为2.66 h(孔隙体积为1 331 mL,以注入速率1 mL/min注入0.12 PV的边水),累积增油量为44 mL,提高采收率4.4%,二

氧化碳对原油的溶解降黏作用提高了边水对近井地带的洗油效率,整体上体现为采收率增加值最大。

2.3.2 压力变化

从氮气-二氧化碳复合吞吐过程中各井点压力变化(图7)可以看出,注0.2 PV氮气与二氧化碳混合气过程中,各井点压力出现了类似注氮气时的变化过程,各井点压力先缓慢增加,后迅速上升,原因是虽然二氧化碳在原油中的溶解度大,但是随着二氧化碳溶解的量不断增加,后续的气体越来越难溶解,造成各井点压力的持续上升,最终上升至约为9.5 MPa。闷井过程中,同样由于溶解性,压力下降幅度越来越小,开井前压力下降至6.8 MPa。

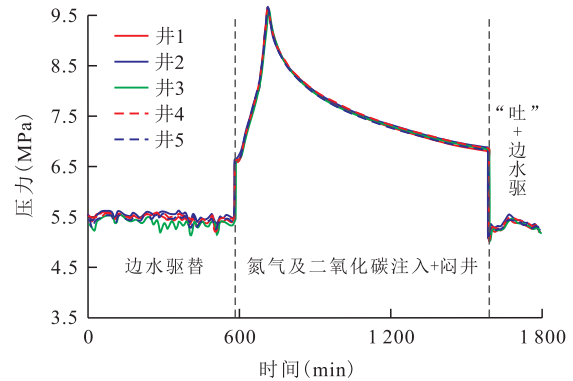


图7 氮气-二氧化碳复合吞吐过程各井点压力变化曲线
Fig.7 Pressure change curves for well points during N₂ and CO₂ compound huff and puff

闷井结束,开井产液瞬间,各井点压力上升,由5 MPa上升至5.4 MPa,并且后续压力下降幅度较纯氮气小,经过一段较长的时间才与回压平衡,氮气-二氧化碳复合吞吐与氮气吞吐相比,控抑边水时间较短,可能是闷井过程中二氧化碳在原油中的溶解量较多,吞吐生产时留在模型孔隙中的量较少,膨胀作用较氮气弱,因而氮气-二氧化碳控抑边水效果较氮气差。

2.4 3种吞吐介质控抑边水效果对比

从3种吞吐介质吞吐过程中井5的压力(可近似代表模型压力)变化曲线(图8)可以看到,3种吞吐介质在闷井阶段的地层压力变化各不相同。对纯氮气和氮气与二氧化碳的复合气而言,闷井过程中压力下降幅度明显,原因是气体在原油中的不断溶解和向远井地带的扩散运移,氮气与表面活性剂的压力下降幅度较小,原因可能是表面活性剂在油水界面上的吸附阻碍了氮气向原油中的溶解,因而在闷井结束时,压力明显高于其他2种吞吐介质。

闷井结束后,开井采液的瞬间,氮气吞吐实验的模型压力增加值相比于其它两种吞吐介质要大,

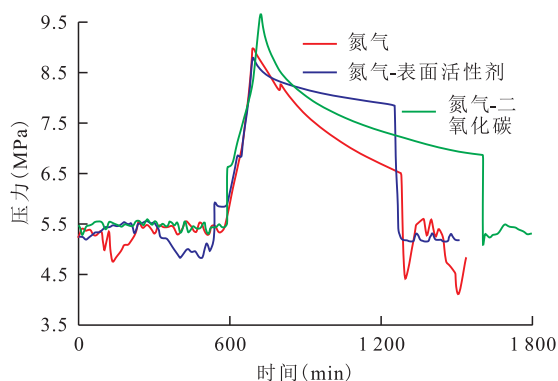


图8 3种吞吐介质吞吐过程中井5压力变化曲线

Fig.8 Pressure change curves for Well5 during huff and puff by three huff and puff media

但压力很快又下降至回压,说明氮气控抑边水效果显著,但持续效果相对较差;氮气-表面活性剂复合吞吐压力上升幅度不大,一方面是气体的用量减少,另一方面可能是表面活性剂阻碍了氮气与边水的接触,并且每个压力峰值下降时间快,对边水的控抑持续时间短,因此,表面活性剂对氮气控抑边水效果的增加不明显;氮气-二氧化碳复合吞吐开井瞬间压力峰值较纯氮气低,是由于氮气总的物质的量减少一半,且部分二氧化碳溶解在原油中,因而开井瞬间对边水推进的阻碍作用减弱,另外由于压力降低,溶于原油中的二氧化碳持续析出,二氧化碳膨胀作用和产生的贾敏效应对边水推进有一定的阻力,模型压力先是保持在一定值一段时间后,上升到最大值然后缓慢降低,说明氮气-二氧化碳的复合吞吐具有一定的持续控抑边水效果。

从3种吞吐介质作用下的边水控抑时间和采收率增加值对比可知,氮气吞吐的采收率增加值最低,为2.9%;氮气-表面活性剂复合吞吐控水持续时间与纯氮气对比相差不大(3.31 h与3.24 h),且增加了近井地带的洗油效率,采收率提高至3.37%;二氧化碳具有一定的膨胀性,以及压力降低产生的贾敏效应,对氮气控抑边水起一定的持续作用,但是相比于纯氮气,二氧化碳在原油中的溶解量较多,游离在孔隙中的气体量较少,控抑边水持续时间较短,为2.66 h,另外二氧化碳对原油的降黏作用,增加了吞吐过程的驱油效率,提高采收率4.4%,整体上表现为氮气-二氧化碳复合吞吐增油效果最好。

3 结论

吞吐过程中含水率变化及井点压力变化分析表明,氮气吞吐及氮气-表面活性剂/氮气-二氧化碳复合吞吐具有控抑断块油藏边水突进的可行性;3

种吞吐介质的控水效果与采收率效果对比分析表明,氮气吞吐控水能力最强,但采收率较低;相比于氮气吞吐,氮气与表面活性剂及二氧化碳的复合吞吐,不但可以控抑边水突进,还可增加近井地带的驱油效率,进一步提高采收率。

浅层边水断块油藏开发方案设计中,应考虑采用既具有控抑边水能力又能进一步提高原油采收率的氮气复合吞吐,可在控抑边水突进,提高边水波及体积的同时,利用表面活性剂和二氧化碳增加近井地带的驱油效率,取得最佳的吞吐开发效果。

氮气-表面活性剂吞吐实验中未考虑氮气与表面活性剂形成泡沫对实验结果的影响,实验结果可能有所偏差;另外,该实验是在浅层边水断块油藏特高含水期进行的氮气及其复合吞吐实验研究,若在油藏高含水或较高含水期进行吞吐实验,控抑边水及采收率效果会更好。

参考文献

- [1] 杜金虎,杨涛,李欣.中国石油天然气股份有限公司“十二五”油气勘探发现与“十三五”展望[J].中国石油勘探,2016,21(2):1-15.
DU Jinhu, YANG Tao, LI Xin. Oil and gas exploration and discovery of PetroChina Company Limited during the 12th Five-Year Plan and the prospect during the 13th Five-Year Plan [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(2): 1-15.
- [2] 杨胜来,王亮,何建军,等. CO₂吞吐增油机理及矿场应用效果[J].西安石油大学学报:自然科学版,2004,19(6):23-26.
YANG Shenglai, WANG Liang, HE Jianjun, et al. Oil production enhancing mechanism and field applying result of carbon dioxide huff-puff [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2004, 19(6): 23-26.
- [3] 王志兴,赵凤兰,侯吉瑞,等.断块油藏水平井组CO₂协同吞吐效果评价及注气部位优化实验研究[J].石油科学通报,2018,3(2):183-194.
WANG Zhixing, ZHAO Fenglan, HOU Jirui, et al. Synergistic effects during CO₂ huff and puff of horizontal well groups in a fault-block reservoir and gas injection optimization under laboratory conditions [J]. Journal of Petroleum Science Bulletin, 2018, 3(2): 183-194.
- [4] 侯广.致密油体积压裂水平井CO₂吞吐实践与认识[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):163-167.
HOU Guang. Practice and understanding of the CO₂ huff-puff for the volume fractured horizontal well in tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 163-167.
- [5] 王秋月. TH稠油油藏注CO₂/烟道气提高采收率实验研究[D].成都:西南石油大学,2017.
WANG Qiuyue. Experiment study of EOR in TH heavy oil reservoir by CO₂/flue gas injection [D]. Chengdu: Southwest Petroleum

- University, 2017.
- [6] 侯利,赵军梅,李凤玲,等.边底水油藏CO₂吞吐控水稳油技术研究[J].内蒙古石油化工,2017,43(9):72-74.
HOU Li, ZHAO Junmei, LI Fengling, et al. Study of stabilizing oil production by water control during CO₂ huff-puff in reservoir with bottom and edge water[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2017, 43(9): 72-74.
- [7] 周拓,刘学伟,王艳丽,等.致密油藏水平井分段压裂CO₂吞吐实验研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2017,39(2):125-131.
ZHOU Tuo, LIU Xuewei, WANG Yangli, et al. Experiments of CO₂ huff-n-puff process in staged fracturing horizontal wells for developing tight oil reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2017, 39(2): 125-131.
- [8] 庞诗师.CO₂/N₂吞吐提高稠油采收率实验与数值模拟研究[D].成都:西南石油大学,2016.
PANG Shishi. Experiment of enhancing heavy oil recovery and study of numerical stimulation for CO₂/N₂ huff and puff [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [9] 孙雷,庞辉,孙扬,等.浅层稠油油藏CO₂吞吐控水增油机理研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2014,36(6):88-94.
SUN Lei, PANG Hui, SUN Yang, et al. Mechanism study on water control and enhanced oil recovery by CO₂ huff-puff for shallow heavy oil reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(6): 88-94.
- [10] 章星,王珍珍,王帅,等.可视装置中CO₂与正戊烷或原油接触特征和表征方法[J].石油实验地质,2017,39(3):402-408.
ZHANG Xing, WANG Zhenzhen, WANG Shuai, et al. Visual contact characteristics and characterization of the CO₂ and n-pentane/crude oil interface [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(3): 402-408.
- [11] 马铨峥,杨胜来,韩伟,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组致密油储层氮气吞吐物理模拟实验研究[J].油气地质与采收率,2018,25(1):112-116.
MA Quanzheng, YANG Shenglai, HAN Wei, et al. Experimental study on the physical simulation of N₂ huff and puff of the tight oil reservoir in the Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 112-116.
- [12] 王鹏,赵凤兰,侯吉瑞,等.氮气泡沫吞吐抑制潜山底水油藏水平井底水锥进实验研究[J].油气地质与采收率,2018,25(5):110-115.
WANG Peng, ZHAO Fenglan, HOU Jirui, et al. An experimental study of horizontal bottom water coning control with nitrogen foam huff and puff in buried-hill reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 110-115.
- [13] 孙永鹏,杨胜来,徐君,等.低渗油藏单井N₂吞吐效果影响因素实验研究[J].断块油气田,2011,18(1):83-86.
SUN Yongpeng, YANG Shenglai, XU Jun, et al. Experiment research on influence factors of N₂ huff-puff for single well in low permeability reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 83-86.
- [14] 张国强,孙雷,吴应川,等.小断块油藏CO₂/N₂单井吞吐强化采油可行性对比研究[J].钻采工艺,2008,31(4):53-55,73.
ZHANG Guoqiang, SUN Lei, WU Yingchuan, et al. Feasibility study on single well CO₂, N₂ huff and puff in small fault block reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(4): 53-55, 73.
- [15] 李亮,张建军,林森,等.底水油藏高含水水平井注N₂实验与参数优化[J].断块油气田,2016,23(3):354-357.
LI Liang, ZHANG Jianjun, LIN Sen, et al. Experiment research and parameter optimization of N₂ huff and puff for watered-out horizontal well in bottom water reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(3): 354-357.

编辑 王星