

常规稠油边水油藏氮气泡沫抑制水侵试验

王杰祥,王腾飞,任文龙,韩 蕾,夏金娜

(中国石油大学 石油工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:稠油开发中油藏边水的存在造成吞吐井迅速水淹,产量急剧降低。根据河南油田边水稠油油藏的特点,建立能够模拟油藏边水的蒸汽吞吐物理模拟试验装置,在分析泡沫剂和稠油性能基础上对氮气泡沫抑制边水的影响因素及应用条件进行研究。结果表明:氮气泡沫抑制边水技术适用于原油黏度较低、边水能量适中、非均质性较强的油藏,且在强水淹时实施能取得较好的抑制边水效果,应先注入 N_2 段塞,再注 N_2 泡沫段塞,然后 N_2 与蒸汽混注;试验期累积增油 9 691 t,平均含水率下降 9.2%,单井油气比提高 0.11,投入产出比为 1 : 1.72,控水增油效果明显,达到了抑制边水的目的。

关键词:油藏;稠油;蒸汽吞吐;边水;氮气泡沫

中图分类号:TE 345 **文献标志码:**A

Experiment on nitrogen foam anti-edge water invasion in normal heavy oil reservoir with edge water

WANG Jie-xiang, WANG Teng-fei, REN Wen-long, HAN Lei, XIA Jin-na

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: In heavy oil reservoir with edge water, the production well is flooded very soon, and the oil production decreases sharply. An experimental device simulating edge water was designed according to the feature of Henan heavy oil reservoir with edge water. The influence factors and application conditions of nitrogen foam anti-edge water invasion technique were researched by analyzing performance of Henan foam agent and crude oil. The results show that the anti-edge water invasion technique is fit for the heterogeneous reservoir with a moderate energy edge water and low viscosity heavy oil, and a better blocking result will be gotten at the time of serious flooding. The optimum injection mode is N_2 plug firstly, followed by nitrogen foam plug, and then the plug of N_2 and steam mixture. During pilot tests, 9 691 t extra crude oil is produced, the average water cut decreased by 9.2%, and the oil and gas ratio increased by 0.11. The input-output ratio is 1 : 1.72. The water cut decreases and oil production increases significantly, so the target of edge water inhibition is achieved.

Key words: reservoir; heavy oil; steam stimulation; edge water; nitrogen foam

蒸汽吞吐能大幅度提高稠油油藏的采收率^[1-5],抑制稠油油藏边水入侵,进一步提高边水稠油油藏的采收率是目前稠油油藏开发中亟待解决的问题^[6-8]。泡沫由于具有“堵水不堵油、堵大不堵小”的优良特性,被广泛应用于酸化、压裂、调剖、堵水等增产措施中^[9-14]。在边水水淹严重的吞吐井中注入氮气泡沫,封堵高含水高渗透层段,使蒸汽转向未波

及的高含油层段,达到降水增油、抑制边水推进、提高边水油藏开发效果的目的。河南油田稠油油藏边水能量强,水油体积比大,蒸汽吞吐开发中边水侵入严重。笔者建立一套能够模拟油藏边水的蒸汽吞吐物模模型,对氮气泡沫抑制边水的影响因素及应用条件进行试验研究。

收稿日期:2012-09-21

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05011-002);长江学者和创新团队发展计划(IRT1294)

作者简介:王杰祥(1963-),男,教授,博士,从事油田化学及提高采收率方面的研究。E-mail:jiexiangwang@upc.edu.cn。

1 试验

1.1 泡沫剂性能评价

对油田提供的高温泡沫剂的起泡和稳泡性能、常温和高温(250℃)下的封堵性能进行评价。采用搅拌法测定起泡体积和泡沫半衰期;用一维填砂模型($\Phi 25\text{ mm} \times 600\text{ mm}$)以阻力因子为指标评价封堵性能,流量 1 mL/min 下测定基础压差,泡沫剂与氮气 $1:1$ 混注,测定注入速度为 1 mL/min 时的泡沫阻力因子,填砂管两端压差稳定后转注地层水,注入速度为 1 mL/min ,注入 $4V_p$ (V_p 为孔隙体积)后停止试验,测定残余阻力因子。

1.2 原油物性评价

测定新9409和新57141油样的凝点、密度、族组分及黏温特性。

1.3 氮气泡沫抑制边水试验

针对河南油田热采单元具有边水的稠油油藏的特点,建立能够模拟油藏边水的蒸汽吞吐物理模拟试验装置,如图1所示。研究油层水淹程度(以周期综合含水率表征)、边水能量(以边水压力表征)、原油物性(主要为黏度)、油层非均质性(以渗透率级差表征)以及注入方式对氮气泡沫抑制边水效果的影响,并在此基础上优选出氮气泡沫封堵边水的应用条件。

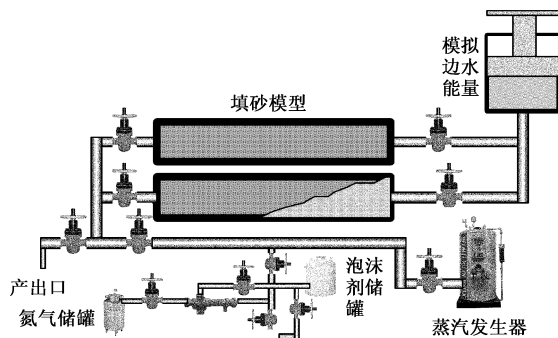


图1 蒸汽吞吐模拟试验装置示意图

Fig.1 Sketch map of steam stimulation experimental device

试验温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,模型尺寸 $\Phi 25\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$,用水为河南油田模拟污水(水型 NaHCO_3 ,矿化度 4.735 g/L),用油为河南油田提供脱水脱气稠油油样,蒸汽温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、干度 70% 。试验方法:连接试验装置,检查气密性,饱和水、饱和油,注蒸汽后焖井,打开边水,放喷生产,产水率达到 98% 时周期结束,记录产油量与产水量,计算原油采出程度与周期综合含水率。当周期综合含水率达到预定值(模拟

不同水淹程度)时,注氮气泡沫+ N_2+N_2 蒸汽,焖井,开井生产,后续氮气泡沫+ N_2+N_2 蒸汽至周期综合含水率 98% 。

2 结果讨论

2.1 泡沫剂性能

常温下,质量分数 0.5% 的泡沫剂溶液 100 mL 高速搅拌 1 min 后产生泡沫 690 mL ,泡沫半衰期可超过 140 min ,泡沫体系起泡体积大,半衰期长,表明河泡沫剂具有良好的起泡和泡沫稳定性能。

常温和高温下的封堵性能试验结果如图2所示,试验中填砂管渗透率为 $1.5\text{ }\mu\text{m}^2$ 。

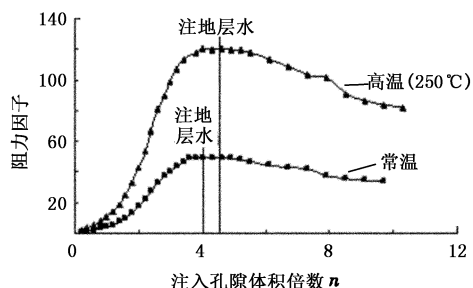


图2 泡沫封堵性能评价

Fig.2 Evaluation of foam sealing characteristics

由图2可知:常温和高温下,泡沫阻力因子均随泡沫注入量的增加而迅速增加,然后趋于平稳,但是相同注入体积下常温时阻力因子明显高于高温时的阻力因子,即泡沫的封堵性能随温度的升高而降低,但是高温下阻力因子仍可达 49 ,远大于液流转向最小阻力因子 $4^{[15]}$,仍具有很好的封堵性能;常温和高温下,转注地层水后阻力因子均有所降低,但是降幅不大,注入 $4V_p$ 地层水后阻力因子仅由 120 和 49 降为 81 和 33 ,阻力因子保留率均达 67% ,说明在常温和高温下泡沫剂均能有效且持久的封堵水流通通道,提高驱替压差,具有优良的封堵性能。

2.2 原油物性

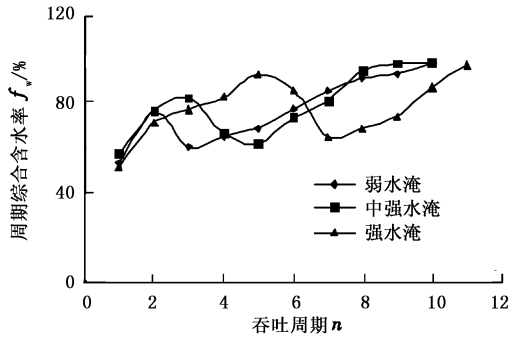
试验测定新9409原油的凝点为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,密度 $0.9577\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,沥青质含量 0.458% 、胶质含量 37.332% 、芳香分和饱和分含量 24.102% 和 38.108% ;新57141原油凝点 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,密度为 $0.9619\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,沥青质和胶质含量为 3.276% 和 54.818% ,芳香分和饱和分含量 19.185% 和 22.721% ;两种原油的黏度均对温度敏感,且相同温度下,新57141原油的黏度明显高于新9409的,分析其原因认为这是由于两种原油族组分不同的差异引起的,新57141原油的胶质沥青质含量远高于新9409原油,使得相

同条件下新 57141 原油黏度较高。

2.3 氮气泡沫抑制边水影响因素及应用条件

2.3.1 水淹程度

以周期综合含水率表征油层水淹程度,研究油



层水淹程度对氮气泡沫封堵边水的影响。试验中原油为新 9409 脱水脱气原油,边水能量 4 MPa,共进行 3 组试验,填砂模型渗透率约为 $4.5 \mu\text{m}^2$,试验结果如图 3 所示。

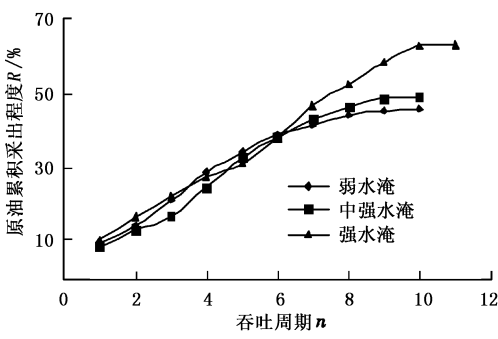


图 3 水淹程度对氮气泡沫抑制边水的影响

Fig. 3 Influence of flooding level on nitrogen foam anti-edge water-cupping result

由图 3 可知:3 种水淹程度下注入氮气泡沫后周期综合含水率均有一定程度的降低,但相比之下强水淹(周期综合含水率 90%)和中强水淹(周期综合含水率 80%)时注泡沫后周期综合含水率的降低幅度大于弱水淹(周期综合含水率 70%)时注泡沫的降低幅度,且强水淹时注泡沫后周期综合含水率恢复上升趋势较缓,说明强水淹时注泡沫抑制边水的控水效果最好;注泡沫抑制边水后原油累积采出程度的增长速度明显变快,且强水淹时注泡沫抑制边水的采收率要大于中强水淹和弱水淹时的采收率,即强水淹时注氮气泡沫抑制边水的效果最好。这是由于水淹程度低时边水窜进的水流优势通道较少,窜进的边水水量较少,此时注泡沫封堵水流通道

后降低的产水量较少,周期综合含水率降低幅度较小,而强水淹时注泡沫由于产水量大幅度降低,周期综合含水率降低幅度明显大于弱水淹时的降低幅度;同时,水淹程度较高时,水流通道的含油饱和度较低,形成的泡沫封堵更稳定,更利于蒸汽转向未波及的含油饱和度高的孔道,提高原油采收率^[16]。

边水能量为 2 和 6 MPa 时水淹程度对氮气泡沫抑制边水的影响规律与 4 MPa 时的相同。

2.3.2 边水能量

以边水压力表征边水能量,研究边水能量对氮气泡沫抑制边水的影响。试验中原油为新 9409 脱水脱气原油,强水淹时注泡沫,共进行 3 组试验,填砂模型渗透率约为 $4.5 \mu\text{m}^2$,试验结果如图 4 所示。

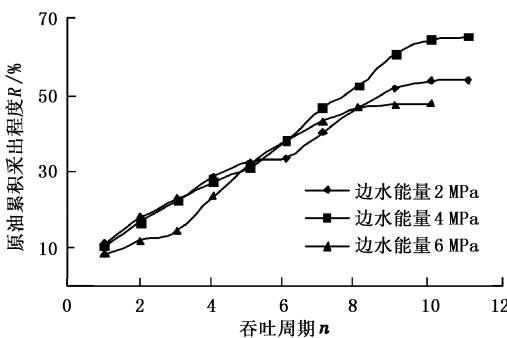
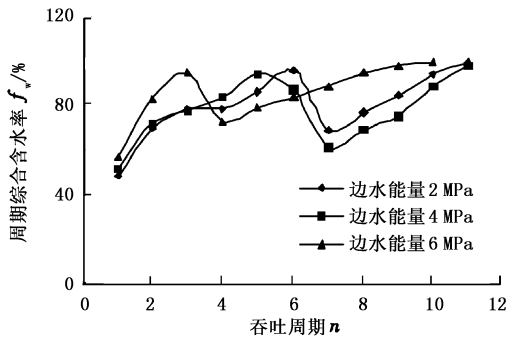


图 4 边水能量对氮气泡沫抑制边水的影响

Fig. 4 Influence of edge water energy on nitrogen foam anti-edge water-cupping result

试验中用亚甲基蓝标记边水,可以发现边水能量越大,水侵速度越快,水窜时间越短。边水能量为 2 MPa 时,第 4 周期填砂模型发生水窜,而当边水能量为 6 MPa 时,第 2 周期填砂模型发生水窜。

边水能量为 2 和 4 MPa 时,注泡沫的控水效果好于边水能量 6 MPa 时的效果。这是因为泡沫的封

堵能力有限,当边水能量过大时,注入的泡沫不能有效封堵水窜孔道,控水能力较差;边水能量 2 MPa 和 4 MPa 时,泡沫均能有效封堵水窜通道,控水效果较好。

3 种边水能量下,注泡沫后原油采出程度均有大幅提高,但相比之下边水能量 4 MPa 时的提高幅

度最大。这是因为边水能量弱(2 MPa)时,地层能量不足,仅能驱动较大孔隙中的原油,对小孔隙中的原油驱动力不足,即使注泡沫封堵了水窜通道,边水也难进入小孔道驱出其中的原油,因此边水能量弱时原油采收率不高;边水能量强(6 MPa)时,边水迅速沿大孔道指进形成水窜通道,而注入的泡沫封堵强度有限,不能有效封堵水窜通道并使蒸汽转向,造成小孔道的原油开发效果较差;只有边水能量适中时,泡沫才能有效封堵水流优势通道,使边水能较好

的驱动中小孔隙中因吸收蒸汽热量而黏度大幅度降低的原油,提高原油采收率。

2.3.3 原油物性

利用新 9409 和新 57141 两种脱水脱气原油研究原油物性对氮气泡沫抑制边水的影响,主要考虑了原油黏度的影响,边水能量 4 MPa,强水淹时注泡沫,共进行 2 组试验,填砂模型渗透率约为 4.2 μm^2 ,试验结果如图 5 所示。

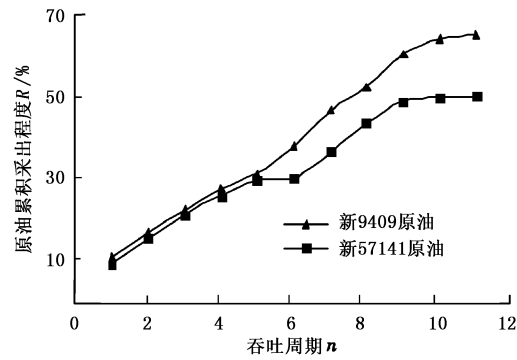
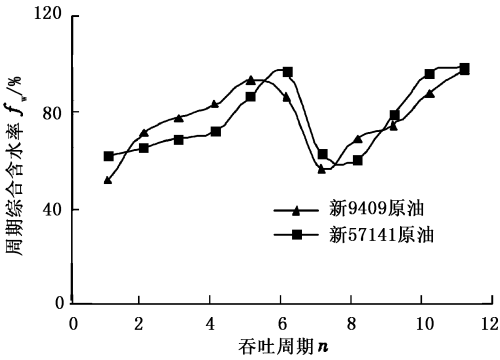


图 5 原油物性对氮气泡沫抑制边水的影响

Fig. 5 Influence of crude oil property on nitrogen foam anti-edge water-cusping result

用亚甲基蓝标记边水可以发现用新 57141 原油进行试验时水窜时间较长,边水侵入速度较慢,新 57141 原油最终采收率低于新 9409 原油的最终采收率,差值为 15%。这是因为相同条件下新 57141 原油黏度明显高于新 9409 的,在相同条件下边水驱动新 57141 原油的阻力更大,水窜时间更长,边水侵入速度更慢,波及体积小,原油最终采出程度低。

2.3.4 非均质性

新 9409 原油在边水能量 4 MPa、周期综合含水率 90%、不同渗透率级差下 3 种不同非均质油层注氮气泡沫抑制边水的试验方案见表 1。试验结果见表 2 和图 6。

表 1 非均质性影响氮气泡沫抑制边水试验方案

Table 1 Experimental program of influence of heterogeneity on nitrogen foam anti-edge water-cusping result

填砂模型 1 渗透率 $k_1/\mu\text{m}^2$	填砂模型 2 渗透率 $k_2/\mu\text{m}^2$	渗透率 级差
4.2	2.7	1.56
4.6	1.5	3.07
4.0	1.0	4.00

不同渗透率级差时,高渗透率管(渗透率分别为 4.2、4.6 和 4.0 μm^2)的原油采出程度随吞吐周期的变化趋势相近,且原油采收率相差不大,而低渗

透率管(相对于高渗透率管而言,但其渗透率也高于 0.05 μm^2)的原油采出程度受渗透率级差影响严重,即非均质性对氮气泡沫抑制边水的影响主要体现在对低渗透率管的影响上。

表 2 不同渗透率级差的低渗透率管采收率分析

Table 2 Oil recovery analysis of low permeability sandpack in different permeability ratios

渗透率 级差	注泡沫前 采收率/%	最终采 收率/%	采收率提高 幅度/%	采收率 提高倍数
1.5	17.6	43.9	26.3	1.50
3.0	14.1	42.9	28.8	2.04
4.0	11.7	38.3	26.6	2.27

低渗透率管的原油采出程度受渗透率级差影响严重,这主要是由于低渗透率管的渗透率差异造成的,渗透率越小,孔隙结构越差,同等条件下的原油采收率越低,因此研究非均质性对泡沫抑制边水的影响时不能仅以采收率提高幅度作为研究指标,同时要着重考虑注泡沫抑制边水后原油采收率提高倍数。由表 2 可以看出:在研究范围内,渗透率级差变大时,低渗管的原油采收率提高倍数随之变大,这说明注泡沫抑制边水技术能有效地封堵高渗层,调整注汽剖面,提高低渗层的原油采收率,且非均质性越强,注泡沫抑制边水技术提高低渗层采收率的效果越明显。

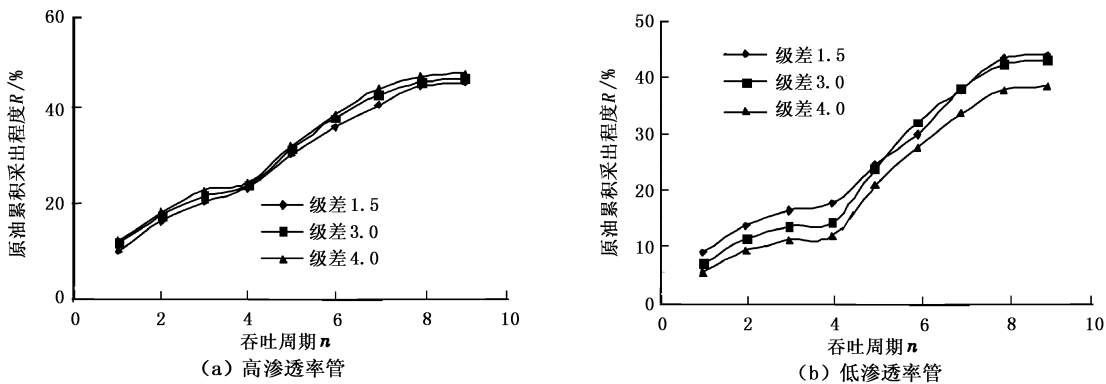


图 6 非均质性对氮气泡沫抑制边水的影响

Fig. 6 Influence of heterogeneity on nitrogen foam anti-edge water-cusping result

2.3.5 注入方式

考察 3 种不同注入方式。试验用油为新 9409 原油,边水能量为 4 MPa,注泡沫时的周期综合含水率为 90%,方案 1 渗透率级差为 3.98,单纯蒸汽吞吐开发;方案 2 渗透率级差为 4.0,蒸汽吞吐至强水

淹后注氮气泡沫+N₂+N₂ 蒸汽;方案 3 渗透率级差为 4.0,蒸汽吞吐至强水淹后注 N₂+氮气泡沫+N₂ 蒸汽,3 种方案均在周期综合含水率达到 98% 时停止试验。试验结果如图 7 所示。

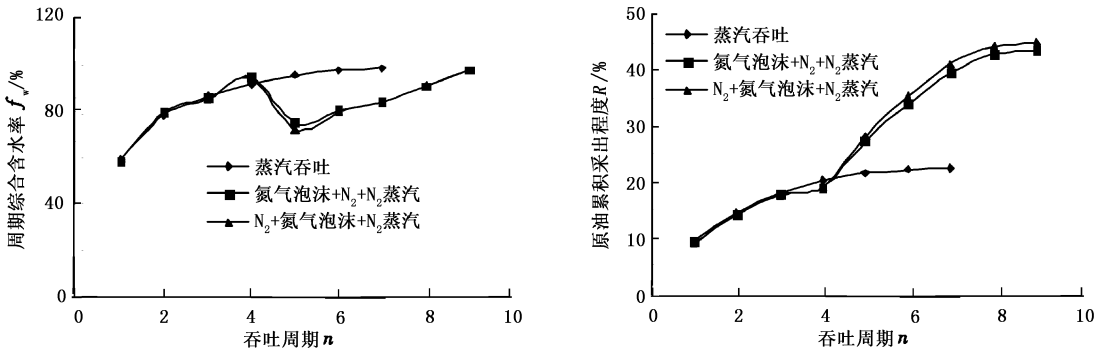


图 7 注入方式对氮气泡沫抑制边水的影响

Fig. 7 Influence of injection mode on nitrogen foam anti-edge water-cusping result

强水淹后,方案 2 和方案 3 均能大幅度降低周期综合含水率,且两种注入方式的控水效果相差不大,方案 3 的效果略好于方案 2。方案 3 的原油采收率提高幅度更大,抑制边水效果更好。因为方案 3 先注入一段 N₂,然后再注泡沫时,N₂ 会在泡沫与地层流体之间形成一个隔离段塞,能显著降低地层水对泡沫剂的稀释作用,提高泡沫在地层中的稳定性,从而可以更好地使蒸汽转向并抑制边水的指进;同时,后注入的泡沫可以近似活塞式的推进 N₂ 段塞,充分发挥 N₂ 的气驱作用,提高原油采收率。

2.3.6 应用条件优选

边水能量相同时,强水淹时注泡沫抑制边水的控水增油效果好于中强水淹和弱水淹时注泡沫的效果;边水能量 4 MPa 时,氮气泡沫抑制边水的效果最好,边水能量过小则不足以驱动小孔隙中的原油,能量过大则泡沫封堵效果较差,不能有效抑制边水窜进,仅有能量适中时,边水既能有效驱替小孔隙中原

油又能有效封堵水窜通道使蒸汽转向,取得较好的抑制边水效果;原油黏度越高,边水水窜时间越长,但是原油最终采收率越低;非均质性越强,注泡沫抑制边水技术提高低渗层采收率的效果越明显,即越能更好体现出该技术的开发效果,越有利于非均质油藏的开发;注入方式 N₂+氮气泡沫+N₂ 蒸汽能更大幅度的提高原油采收率,对注泡沫抑制边水更有利。因此,氮气泡沫抑制边水技术适用于原油黏度较低、边水能量适中、非均质性较强的油藏,且在强水淹时实施能取得最好的抑制边水效果,最佳注入方式为方案 3。

3 现场试验

参照优选的应用条件及现场经验选井进行现场试验,截至 2011 年 10 月,河南油田已实施注氮气泡沫抑制边水施工 139 井次,其中有 27 井次措施井处于注汽后刚生产阶段,效果待评。有 112 井次进行了

阶段预评价,措施井平均排水期缩短了3 d,平均含水率下降9.2%,平均单井油气比提高了0.11,阶段增油9691 t,措施有效率74%,取得了较好的应用效果,减缓了边水的推进速度,达到了抑制边水的目的。

注氮气泡沫抑制边水技术阶段累积增油9691 t,按80%进罐率,90%商品率,吨油成本2737元计算,效益可达1909.75万元,阶段投入产出比1:1.72。统计分析无效井认为措施失败的原因主要有:无效井与周边井存在严重的汽窜;井距原始油水边界很近,施工时动态油水边界已推至该井附近;油层吸汽差或管外窜等。

以新浅25-平2井为例分析氮气泡沫抑制边水效果,该井是新庄油田南三块新浅25断块的一口水水平井,采出程度仅为6%,剩余油饱和度为60.59%,该井自第5周期开始注泡沫抑制边水施工,生产曲线如图8所示。

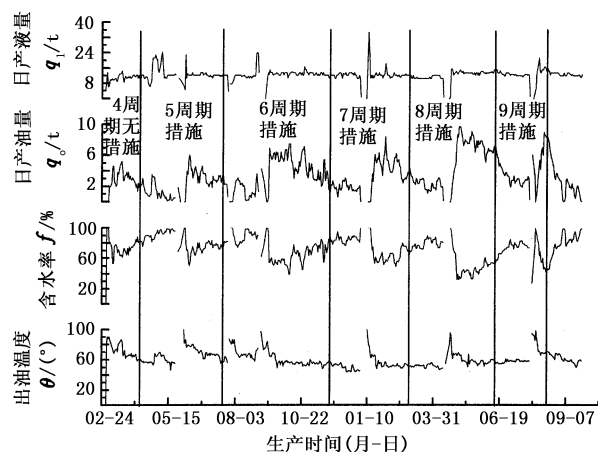


图8 新浅25-平2井生产曲线

Fig.8 Production curve of well Xinqian 25-ping 2

由图8可以看出,注泡沫抑制边水后日产油量峰值明显增加,综合含水率明显降低,控水增油效果显著。

4 结 论

(1)河南油田泡沫剂具有良好的起泡和泡沫稳定性能,在常温和高温下均有较好的泡沫封堵性能,后续注入4V_p地层水后阻力因子保留率仍能高于67%。原油黏度对温度敏感,适于热采开发。

(2)氮气泡沫抑制边水技术的应用条件:原油黏度较低、边水能量适中、非均质性较强的油藏,且在强水淹时实施能取得最好的抑制边水效果,最佳注入方式为N₂+氮气泡沫+N₂蒸汽。

(3)氮气泡沫抑制边水现场试验阶段累积增油9691 t,平均含水率下降9.2%,单井油气比提高

0.11,投入产出比为1:1.72,取得了较好的控水增油效果。

参考文献:

- [1] ZHONG Ligu, ZHANG Shoujun, WU Fei, et al. Improved heavy-oil recovery by separated-zones horizontal-well steam stimulation [R]. SPE 134291, 2010.
- [2] LUO Shanqiang, BAKER Andy. Optimizing horizontal-well steam-stimulation strategy for heavy-oil development [R]. SPE 104520, 2006.
- [3] WU Z, VASANTHARAJAN S. Optimal soak time for cyclic steam stimulation of a horizontal well in gravity drainage reservoirs [R]. SPE 146716, 2011.
- [4] YANG Liqiang, ZHOU Dasheng, SUN Yuhuan. SAGD as follow-up to cyclic steam stimulation in a medium deep and extraheavy —oil reservoir [R]. SPE 104406, 2006.
- [5] 侯健,高达,孙建芳,等.稠油油藏不同热采开发方式经济技术界限[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(6):66-70.
HOU Jian, GAO Da, SUN Jian-fang, et al. Economic and technical boundary values of different thermal recovery methods in heavy oil reservoir development[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(6):66-70.
- [6] 罗瑜,王洪辉,杨宇,等.新庄油田核桃园组稠油油藏边水侵入影响因素分析[J].成都理工大学学报:自然科学版,2008,35(2):144-148.
LUO Yu, WANG Hong-hui, YANG Yu, et al. Analysis of the influential factors in edge water invading of heavy oil reservoir in member 2 and 3 of Hetaoyuan formation in Xinzhuang Oilfield of Henan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008,35(2):144-148.
- [7] 赵长喜,陈渊,张初阳,等.稠油油藏边水封堵技术的研究与应用[J].钻采工艺,2003,26(2):18-20.
ZHAO Chang-xi, CHEN Yuan, ZHANG Chu-yang, et al. Research and application of side water blocking technology in viscous oil reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2003,26(2):18-20.
- [8] 曾祥平.边底水稠油油藏水侵预警分析与治理:以孤岛油田中二北Ng5为例[J].油气地质与采收率,2008,15(1):80-83.
ZENG Xiang-ping. Proximity warning analysis and management of invasion of edge and basal water to heavy oil reservoir: a case study of Ng5 heavy oil in North Zhong 2 Block, Gudao Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008,15(1):80-83.

(下转第88页)