

低渗透裂缝型油藏多轮次调驱物理模拟实验研究

赵阳¹, 吴景春¹, 石芳¹, 杨明²

(1. 东北石油大学提高采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油大庆油田有限责任公司第三采油厂, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:针对某典型低渗透率多裂缝型区块注水开发效果较差的现状,在非常规储层动态模拟系统和低渗透裂缝型三维平板岩心制作技术的基础上,开展了九组大型室内物理模拟驱油实验,研究了不同体系、不同轮次对低渗透裂缝型储层的调驱效果。实验结果表明,弱凝胶体系可以更好的适用低渗透裂缝型油藏环境,对储层中的微裂缝进行有效封堵,优选出“0.1%浓度的800万分子量聚合物+0.1%浓度的交联剂调剖体系溶液+保护段塞”调驱体系。该体系三轮次注入采收率可提高31.35%,同时多轮次调驱效果呈逐次递减的现象,需要结合国际油价和现场实际情况,合理地选取注入轮次。

关键词:低渗透;裂缝油藏;注入轮次;调驱;室内驱油实验

中图分类号:TE357 文献标识码:A

Physical simulation flooding test of multi-turn profile control in low permeability reservoir

Zhao Yang¹, Wu Jingchun¹, Shi Fang¹ and Yang Ming²

(1. Key laboratory of Enhanced Oil Recovery of Education Ministry, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. NO.3 Production Plant of PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: According to the poor water flood development effects of a typical low permeability multi-fractured block, and based on the dynamic simulation experiment system and the production technology of the fractured 3D flat cores with low permeability of the unconventional reservoir, we carried out 9 groups of physical simulation flooding experiments to research the profile control effects of the fractured reservoir with low permeability in the different injection systems and injection rounds. The result showed that the weak gel system better fitted the fractured reservoir with low permeability, and plugged the micro fractures effectively. In addition, the optimized profile control system is composed of 0.1% concentration of 8 million molecular weight polymer, 0.1% concentration of the profile system solution of cross linking agent, and the protection slug. It improved 31.35% of the oil recovery by three injection rounds. Furthermore, the effects of the multi-round profile control decreased. The injected rounds should be selected reasonably according to the international oil price and the actual situation on site.

Key words: low permeability, fractured reservoir, injection round, profile control, indoor displacement experiment

N区块是典型的低渗透率多裂缝型油藏,平均渗透率为 $32.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。区块经过多年注水开发,层间和层内非均质性较为严重,含水上升较快,因此,急需改变现有注入措施,增加原油采收效率。多轮次调驱是在调驱基础上,采用多次段塞注入方式以提高原油产量的一种新方法^[1]。室内实验机理研究

表明,多轮次调驱在技术和工艺上是可行的^[2-5],同时国内外一些多轮次调驱矿场先导性试验均取得了较好的稳油控水效果^[6-9]。而针对低渗透多裂缝型油藏,多轮次调驱技术的相关研究则较少。因此,利用非常规储层动态模拟系统和低渗透裂缝型三维平板岩心制作技术^[10],通过室内物理模拟驱油实验研究不

收稿日期:2017-06-05。

第一作者简介:赵阳(1987—),男,在读博士研究生,提高采收率原理与技术研究。

基金项目:国家自然科学基金项目“凝胶与化学剂段塞式多轮次交替注入调驱技术应用研究”(51274070);东北石油大学研究生创新科研项目“微生物体系在多孔介质中滞留迁移规律研究”(YJSCX2016-008NEPU)。

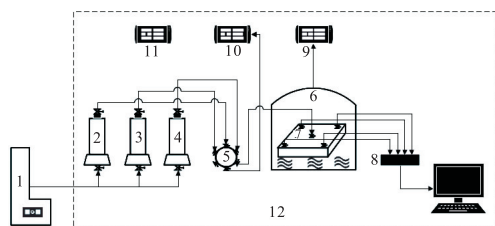
同调驱体系多轮次注入的调驱效果,优选调驱体系及注入轮次,实验结果可指导N区块现场先导性试验。

1 实验装置及材料

实验装置主要包括:非常规储层动态模拟系统、D-250L型恒压恒速泵、ISCO泵、中间容器、六通、油水采出计量装置等。由于低渗透油藏渗透率和孔隙度较低,启动压力梯度和实验压力较大,而在常规驱替实验中,环氧树脂浇铸三维平板岩心通常耐压不超过3 MPa,不能很好地模拟低渗透油藏的实际情况,因此,需用非常规储层动态模拟系统。该系统主要由高压夹持器、压力监测系统、温度控制系统组成。其中高压夹持器由锻压碳钢制造,耐压能力可达到20 MPa,其耐压原理主要是将高压夹持器中充满水,在实验过程中,通过压力检测系统控制水压,保持浇铸三维平板岩心环氧树脂层内部与外部的压力差不超过1 MPa。非常规储层动态模拟系统装置



图1 非常规储层动态模拟系统装置
Fig. 1 Dynamic simulation experiment system of unconventional reservoir



1.ISCO泵;2.地层水容器;3.油容器;4.体系容器;5.六通阀门;
6.高压夹持器;7.三维平板岩心;8.油水采出计量装置;9.压力
控制器;10.压力监测器;11.温度控制器;12.非常规储层动态
模拟系统

图2 实验流程图

Fig. 2 Flow diagram of experiment

见图1,实验流程图见图2。

实验所需材料包括:实验用原油(取自N区块现场,黏度为9.8 mPa·s)、实验用水(配制N区块现场模拟地层水,矿化度为4 338 mg/L)、低渗透裂缝型三维平板岩心(尺寸:30 cm×30 cm×4.5 cm)、试管、烧杯、管线等。

在低渗透裂缝型三维平板岩心制作过程中,按照符合N区块现场的裂缝长度和开度设计要求,将水溶性材料预埋到未胶结石英砂环氧树脂混和物内部,之后加压成形和升温固化,外部浇铸环氧树脂。通过不断向制作好的三维平板岩心中注入去离子水,将岩心中的水溶性材料溶解,即得到低渗透裂缝型三维平板岩心^[11],设计岩心平均渗透率为 $35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,井网采用一注四采五点法井网,其中心井为注入井,注入井与采出井井距为21.21 cm,三维平板岩心示意图见图2。

2 实验步骤

1) 将制作好的低渗透裂缝型三维平板岩心放入高压夹持器中,密封好后将夹持器内部充满水,检查管线连接无误后进行实验,实验温度为55℃。

2) 对岩心进行抽真空处理,抽真空时间为12 h,向岩心中饱和和配制好的地层水,根据饱和和地层水量计算孔隙体积和孔隙度,恒温放置12 h。

3) 将岩心饱和原油,根据驱替出的水量计算岩心原始饱和度,恒温放置12 h。

4) 水驱岩心,驱替速度为1.5 mL/min,水驱至含水率达到98%时停止,记录进口端压力变化及油水产出情况。

5) 注入段塞,驱替速度为1.5 mL/min,注入总量为0.3PV,记录进口端压力变化及油水产出情况,调驱体系需关井至调驱剂候凝。

6) 后续水驱岩心至不出油,记录进口端压力变化及油水产出情况。

7) 绘制进口端压力、含水率、采收率与注入量关系曲线。

3 实验方案

共进行了9组物理模拟驱油实验,分析了不同调驱剂、不同注入轮次对低渗透裂缝型油藏调驱

的影响。其中配制了三种不同段塞体系,体系一采用0.1%浓度的800万分子量聚合物溶液,体系二采用0.1%浓度的800万分子量聚合物+0.1%浓度的交联剂调剖体系溶液,体系三先注入50%注入量0.1%浓度的800万分子量聚合物+0.1%浓度的交联剂调剖体系溶液,后注入50%注入量0.1%浓度的800万分子量聚合物保护段塞。1#~3#岩心注入段塞选用体系一,4#~6#岩心注入段塞选

用体系二,7#~9#岩心注入段塞选用体系三。其中1#、4#和7#岩心采用1轮次注入方式注入,每轮次注入量分别为0.3PV;2#、5#和8#岩心采用2轮次注入方式注入,每轮次注入量分别为0.15PV,注入总量分别为0.3PV;3#、6#和9#岩心采用3轮次注入方式注入,每轮次注入量分别为0.1PV,注入总量分别为0.3PV;每轮次体系注入后后续水驱至不出油再进行下一轮次的注入,具体各组实验参数见

表1 物理模拟实验参数
Table 1 Parameters of physical simulation experiments

岩心编号	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	孔隙度,%	含油饱和度,%	注入体系	总注入轮次	单轮注入量/PV	总注入量/PV
1#	38.6	31.6	60.5		1	0.3	0.3
2#	37.8	30.8	59.3	一	2	0.15	0.3
3#	39.5	31.9	61.2		3	0.1	0.3
4#	40.3	32.3	61.9		1	0.3	0.3
5#	37.9	30.5	59.5	二	2	0.15	0.3
6#	39.6	31.2	60.8		3	0.1	0.3
7#	38.3	30.6	59.6		1	0.3	0.3
8#	37.5	29.8	58.5	三	2	0.15	0.3
9#	39.2	31.5	60.3		3	0.1	0.3

表1。

4 实验结果与讨论

由表2和图3可知,不同配方体系提高原油采收率效果不同,4#~9#岩心的效果要好于1#~3#岩心。这是由于1#~3#岩心是单一聚合物驱,4#~9#岩心是弱凝胶调驱。对于低渗透裂缝型油藏,使用弱凝胶体系可以更好地适用油藏环境,对储层中的微裂缝进行

有效封堵,改善储层非均质性,改变水驱水流通道,动用滞留剩余油。

注入同一配方体系,随着注入轮次的增加,措施后采收率的提高值变高,驱油效果变好。这主要由于不同轮次注入的体系在岩心中的作用位置不同,一轮注入的体系是在注入井周围起到调驱作用,而多轮次的注入,是在流线上的不同位置起到调驱作用,从而更有效地扩大水的波及体积,提高原油产量。6#岩心效果最好,措施后采收率可提高33.14%,比同样是总

表2 物理模拟实验数据
Table 2 Experimental data of physical simulation

岩心编号	注入体系	总注入轮次	水驱采收率,%	措施后驱替效率提高值,%	总采收率,%	总注入量/PV	最高压差/MPa
1#		1	30.41	13.98	44.39	5.13	3.52
2#	一	2	29.58	17	46.58	5.35	3.36
3#		3	28.76	18.13	46.89	5.7	3.42
4#		1	31.72	26.79	58.51	6.83	4.85
5#	二	2	30.17	31.49	61.66	7.17	5.16
6#		3	29.35	33.14	62.49	7.87	5.36
7#		1	28.79	24.83	53.62	6.25	5.13
8#	三	2	30.06	29.56	59.62	7.11	5.28
9#		3	29.81	31.35	61.16	7.76	5.51

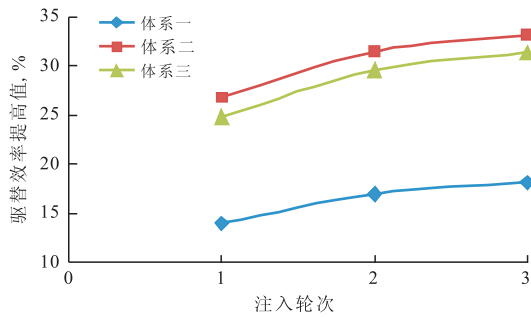


图3 注入轮次与不同岩心的驱替效率提高值关系曲线
Fig. 3 Relation curves of injection rounds and oil displacement efficiency in different cores

注入轮次为3轮的9#岩心要高1.79%。

由图4可知,驱替过程中的总注入量也随着注入轮次的增加而变大。这是由于在体系注入总量不变的情况下,增加了后续水驱的用量。虽然4#~6#岩心的采收率效果最好,但其交联剂的用量是7#~9#岩心用量的一倍,注入井总注入量也高于7#~9#岩心。在目前国际低油价的环境下,建议采用先注入50%注入量0.1%浓度的800万聚合物+0.1%浓度的交联剂调剖体系溶液,后注入50%注入量0.1%浓度的800万聚合物保护段塞的方式进行现场调驱试验。

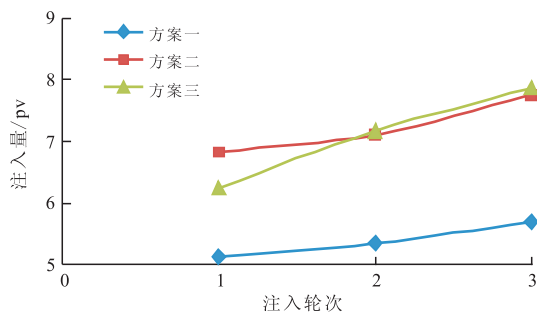


图4 注入轮次与不同岩心的总注入量关系曲线
Fig. 4 Relation curves of injection rounds and total injection rate in different cores

图5是6#岩心采收率、含水率和压力与注入量关系曲线。该驱油动态曲线分为四个部分,分别是水驱阶段、一轮注入阶段(注入体系+后续水驱)、二轮注入阶段(注入体系+后续水驱)和三轮注入阶段(注入体系+后续水驱)。由图5可知,注入体系后,含水率下降,注入压差升高,当继续注入后续水,含水率先上升再有所下降,即在曲线中每个阶段都会出现两个低谷,注入压差继续升高,表明体系在岩心中继续成胶,不仅起到了调剖的作用,同时还具有驱油

的作用,这也正是弱凝胶调驱的特点之一。由于不同轮次注入采收率的提高值有所不同,因此,需进一步研究注入轮次与采收率之间的关系。

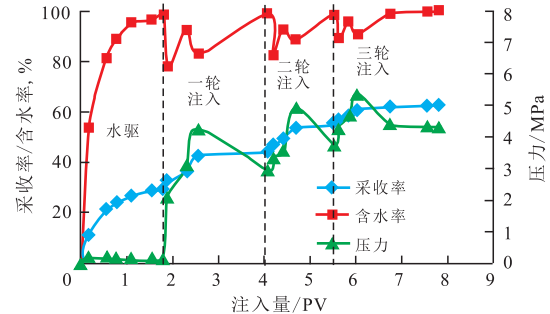


图5 6#岩心驱油动态曲线
Fig. 5 Oil displacement dynamic curves of 6# core

表3给出的是不同注入轮次每个轮次驱油效果实验数据,注入同一配方体系,对比不同轮次的每个轮次提高采收率变化可知,多轮次调驱效果呈逐次递减的现象。这主要由于体系都是从同一口注入井注入,增加注入轮次,会产生一个重叠的驱油效果^[12],从而降低了采收率的提高幅度,同时随着注入轮次的增加,注入井附近的滞留剩余油得到有效动用,使得后续注入的体系作用半径变大,岩心受效面积变

表3 不同注入轮次每个轮次驱油效果实验数据
Table 3 Experimental data of different injection rounds

岩心编号	注入体系	轮次	注入量/PV	驱替效率提高值,%	总驱替效率提高值,%
1#		一轮	0.3	13.98	13.98
2#	一	二 第一次	0.15	10.15	17
		二 第二次	0.15	6.85	
3#	三	三 第一次	0.1	8.15	18.13
		三 第二次	0.1	5.58	
		三 第三次	0.1	4.4	
4#		一轮	0.3	26.79	26.79
5#	二	二 第一次	0.15	18.75	31.49
		二 第二次	0.15	12.74	
6#	三	三 第一次	0.1	15.03	33.14
		三 第二次	0.1	10.89	
		三 第三次	0.1	7.22	
7#		一轮	0.3	24.83	24.83
8#	二	二 第一次	0.15	16.23	29.56
		二 第二次	0.15	13.33	
9#	三	三 第一次	0.1	13.9	31.35
		三 第二次	0.1	9.5	
		三 第三次	0.1	7.95	

小,出现调驱效果逐次递减的现象。因此,需要结合国际油价和现场实际情况,评价经济效益,合理地选取注入轮次。

对于中高渗透常规油藏,可采取变化不同轮次调驱体系或增加后续轮次注入浓度、注入量的方式以减少调驱效果逐次递减的程度,而对于低渗透裂缝型油藏,由于考虑到现场注入能力等一些客观因素,调驱剂成胶强度及注入量不能过大。通过实验发现,9#岩心三轮注入第三次采收率提高了7.95%,比6#岩心三轮注入第三次采收率高了0.73%。因此,采用注入体系三即注入调驱体系后再注入一定量的聚合物保护段塞,可改善低渗透裂缝型油藏多轮次调驱效果逐次递减的现象。

5 结论

1) 利用非常规储层动态模拟系统和低渗透裂缝型三维平板岩心制作技术,通过室内物理模拟驱油实验研究了低渗透裂缝型油藏多轮次调驱效果。

2) 建议采用先注入50%注入量、0.1%浓度的800万分子量聚合物+0.1%浓度的交联剂调剖体系溶液,后注入50%注入量、0.1%浓度的800万分子量聚合物保护段塞的方式进行现场多轮次调驱试验。

3) 多轮次调驱效果呈逐次递减的现象,需要结合国际油价和现场实际情况,评价经济效益,合理地选取注入轮次。

参考文献

[1] Al-Adasani A, Bai Baojun. Recent developments and updated

screening criteria of enhanced oil recovery techniques[C]// paper SPE-130726-MS presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, 8-10 June 2010, Beijing, China.

- [2] 李国勇,郑峰,贾贻勇,等.高含水期油田多轮次调剖井效果分析与评价[J].海洋石油,2005,25(2):32-34.
- [3] 朱敏.大庆油田扶余油层动态浅调剖技术[J].中外能源,2013,18(7):50-55.
- [4] Elsharafi M O, Bai Baojun. Effect of weak preformed particle gel on unswept oil zones/areas during conformance control treatments [J]. American Chemical Society, 2012, 51(35): 11 547-11 554.
- [5] 陈永浩,曹敏,张国萍,等.多轮次调剖室内实验研究[J].内蒙古石油化工,2011,21(12):168-170.
- [6] 刘凤霞,陈维余,吴清辉,等.绥中36-1油田F8井组多轮次调剖效果分析[J].石油化工应用,2016,35(1):37-40.
- [7] 张桂意,高国强,唐洪涛,等.胜沱油田多轮次调剖效果分析与技术对策[J].精细石油化工进展,2006,7(10):15-19.
- [8] 韩志中.注水井多轮次化学调剖技术研究及应用[J].石油地质与工程,2012,26(1):120-122.
- [9] Dai L C, You Q, Fan X Q. Study and application of anionic and cationic polymers alternative injection for in-depth profile control in low permeability sandstone reservoir [C]// paper SPE-143458-MS presented at the SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 23-26 May 2011, Vienna, Austria.
- [10] 谢坤,卢祥国,金玉宝,等.一种人造裂缝岩心制作方法[P].国家发明专利,CN 105973679 A,2016.
- [11] 胡广斌,卢祥国,张宝岩,等.裂缝参数对储层渗透率和孔隙度影响实验[J].大庆石油地质与开发,2016,35(4):55-58.
- [12] 袁谋,王业飞,赵福麟.多轮次调剖的室内实验研究与现场应用[J].油田化学,2005,22(2):143-146.

(编辑 尹淑容)