

大庆油区三元复合驱耐碱性调剖剂的 研制与段塞组合优化

周亚洲,殷代印,张承丽

(东北石油大学 教育部提高油气采收率重点实验室,黑龙江 大庆 163318)

摘要:针对大庆油区三元复合驱区块中后期含水上升快,不同渗透率油层动用差异大,注入液无效循环的问题,开展了三元复合驱耐碱性调剖剂的研制。通过对交联剂种类及质量分数、聚合物质量浓度及相对分子质量和聚合物溶液熟化时间等的筛选,并结合正交试验,研制出了适用于三元复合驱深部调剖的调剖剂配方,该配方由相对分子质量为 $2\ 500\times 10^4$ 且质量浓度为 $2\ 000\text{ mg/L}$ 的聚合物、质量分数为 0.15% 的离子型交联剂YH-1、质量分数分别为 0.1% 和 0.08% 的有机交联剂THM-1和THM-2以及质量分数为 0.2% 的稳定剂、质量分数为 0.1% 的除氧剂组成,形成的调剖剂成胶时间为 102 h ,成胶粘度为 $3\ 510\text{ mPa}\cdot\text{s}$,稳定时间大于 60 d ,抗盐性好,对三元复合体系界面张力影响不大。该调剖剂应用于三元复合驱调剖时,能够更好地发挥注入液驱替中、低渗透层的作用,比不应用调剖剂的三元复合驱提高采收率 4% 左右。数值模拟结果表明,在注入调剖剂前,加入 0.01 倍孔隙体积的前置聚合物段塞,能够使调剖剂保持更好的成胶性能,效果更好。

关键词:调剖剂 三元复合驱 凝胶 段塞优化 深部调剖 大庆油区

中图分类号:TE357.43

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)05-0073-04

大庆油区三元复合驱取得了显著效果^[1-4],从工业化推广的实际和受效状况看,目前还存在一些问题亟待解决。杏一一二区东部Ⅱ块部分三元复合驱采出井受效状况差,该类井主要集中在基础井网注水井附近,底部油层存在大孔道,造成注入井注入压力低,采出井采聚浓度高,无效循环严重,高渗透层相对吸液量达 69.2% ,吸液厚度比例仅为 23.9% ,注入强度达 $15.6\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,比区块平均值高 $9.4\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,且井区注入井油层发育以合层为主,分注潜力小,需深部调剖^[5],目前在强碱体系中尚无成功的调剖经验可借鉴^[6-12]。为此开展三元复合驱调剖技术研究,提高化学药剂利用率,改善区块整体开发效果。结合该区块油藏特点,在 pH 值为 12 的情况下,采用普通聚合物作为主剂,离子和有机化学剂作为交联剂,加入稳定剂和除氧剂,开展三元复合驱耐碱性调剖剂研制,并进行调剖剂段塞组合优化。

1 实验部分

1.1 实验药剂与仪器

聚合物、碱、表面活性剂取自大庆油区杏一一

二区东部Ⅱ块;实验用油是利用井口原油与航空煤油配制成的粘度为 $6.84\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的模拟油。实验所用注入水、地层水离子组成和总矿化度如表1所示。实验所用岩心为 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 4.5\text{ cm}$ 的纵向三层非均质正方形人造岩心,各层渗透率分别约为 300×10^{-3} , 500×10^{-3} 和 $800\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,井网类型为四注一采五点法井网。

表1 注入水和地层水的离子组成							mg/L	
模拟水	阳离子			阴离子			总矿化度	
	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻
注入水	231.2	34.1	24.3	90	225.1	88.7	36	729.3
地层水	1 644	41.68	9.49	273.09	2 221.13	1 014.16	12.49	5 216.04

实验仪器包括:ES-120型电子分析天平、KJ-1型高速搅拌器、NDJ-4粘度计、CS-501型超级恒温器、HXDSY型流动实验仪、LB-1型平流泵和真空泵等。

1.2 实验方法

用配制好的模拟地层水与称量好的聚合物配制成溶液,将其搅拌均匀后,取下熟化,熟化完毕后,将称量好的交联剂加入聚合物溶液中,4 h后,利

收稿日期:2014-06-20。

作者简介:周亚洲,男,在读博士研究生,从事油藏数值模拟及三次采油方面的研究。联系电话:(0459)6503465,E-mail:zhouyazhou720@163.com。

基金项目:国家自然科学基金“考虑启动压力梯度变化的低渗透油藏表面活性剂驱油数值模拟理论研究”(51074034)。

用pH调节剂(质量分数为1.2%的氢氧化钠溶液)将pH值调到12,放入45℃烘箱内定期测定成胶时间和成胶强度,最后利用正交试验方法进行优化。

根据三元复合驱深部调剖要求,在温度为45℃和pH值为12的条件下,调剖剂成胶时间应为72~360 h,成胶强度应为2 000~4 000 mPa·s,稳定时间应在60 d以上。

2 实验结果分析

2.1 交联剂种类的筛选

选用相对分子质量为 $2\,500\times 10^4$ 且质量浓度为2 000 mg/L的聚合物;离子型交联剂分别为YH-1, YH-2, YH-3和YH-4,其质量分数皆为0.1%;有机交联剂为THM-1和THM-2,其质量分数为0.1%;稳定剂为DX-1,质量分数为0.2%;除氧剂为GP-1,质量分数为0.1%。根据实验结果得出,YH-1复配后形成的凝胶在102 h强度达到最大,为2 880 mPa·s,70 d后强度为2 120 mPa·s,表明稳定性较好;YH-2复配后形成的凝胶强度为40 000 mPa·s,其值太大不适合油层深部调剖;YH-3复配后形成的凝胶强度为2 000 mPa·s,但70 d后强度仅为190 mPa·s,表明稳定性较差;YH-4复配后形成的凝胶成胶过快,仅为42 h,且其成胶强度比YH-1复配后的成胶强度小。因此,选用YH-1为交联剂。

2.2 交联剂质量分数的筛选

在离子型交联剂YH-1质量分数为0.1%~0.2%,有机交联剂THM-1和THM-2的质量分数分别为0.1%~0.25%和0.08%~0.2%的条件下,测定成胶性能。实验结果表明,离子型交联剂和有机交联剂质量分数越大,成胶后凝胶强度越大。若离子型交联剂和有机交联剂质量分数过小,则形成的凝胶不能成胶且稳定性差;若离子型交联剂和有机交联剂质量分数过大,则形成的凝胶强度太大而不适于深部调剖。因此,确定YH-1的质量分数为0.15%,THM-1和THM-2的质量分数分别为0.1%和0.08%。

2.3 聚合物相对分子质量的筛选

选用聚合物的质量浓度为2 000 mg/L,相对分子质量分别为 $1\,300\times 10^4$, $1\,500\times 10^4$, $1\,700\times 10^4$, $2\,500\times 10^4$ 和 $3\,500\times 10^4$;YH-1质量分数为0.15%;THM-1和THM-2质量分数分别为0.1%和0.08%。实验结果表明,随着聚合物相对分子质量的增大,成胶强度增强;相对分子质量分别为 $1\,300\times 10^4$,

$1\,500\times 10^4$, $1\,700\times 10^4$ 所形成的调剖剂,未形成长链,没有达到成胶标准;当聚合物相对分子质量为 $2\,500\times 10^4$ 时,102 h后粘度达到最大,为3 510 mPa·s,且稳定性较好;当聚合物相对分子质量为 $3\,500\times 10^4$ 时,调剖剂体系出现颗粒状,不能互相聚合为一种连续的体系,不适于深部调剖^[13-16]。因此,选用聚合物的相对分子质量为 $2\,500\times 10^4$ 。

2.4 聚合物质量浓度的筛选

选用聚合物的相对分子质量为 $2\,500\times 10^4$,质量浓度分别为1 500,1 800,2 000和2 200 mg/L;YH-1质量分数为0.15%;THM-1和THM-2的质量分数分别为0.1%和0.08%。由实验结果可以看出,随着聚合物质量浓度的升高,成胶强度增大,成胶时间缩短。这是因为在一定的条件下,聚合物分子的水力学半径是一定的,随着聚合物质量浓度的增加,聚合物分子之间碰撞、缠绕的几率较大,与交联剂反应的聚合物分子较多,增加了聚合物分子之间的作用力^[17-19],使成胶强度升高。综合考察现场对成胶时间、成胶强度的要求,确定聚合物质量浓度为2 000 mg/L。

2.5 聚合物溶液熟化时间的选择

选用聚合物相对分子质量为 $2\,500\times 10^4$,质量浓度为2 000 mg/L;YH-1质量分数为0.15%;THM-1和THM-2质量分数分别为0.1%和0.08%,将配制好聚合物溶液分别放置2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22和24 h后再添加交联剂。从实验结果(图1)可以看出,当聚合物溶液熟化时间为2~4 h时形成凝胶的强度较低,这是由于熟化时间过短,聚合物在溶液中相互的连接性和依附性还没有完全体现;当聚合物溶液熟化时间为8~18 h时,成胶强度符合成胶标准,其中聚合物溶液熟化时间为12 h时,成胶强度最大为3 510 mPa·s;而当聚合物溶液熟化时间为20~24 h时,聚合物开始进入老化阶段,调剖剂成胶强度明显下降。因此,确定聚合物溶液最佳熟化时间为12 h。

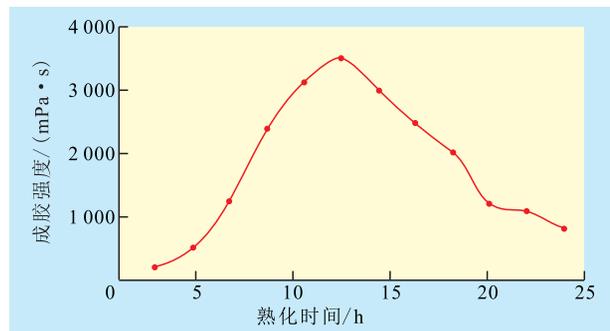


图1 聚合物溶液不同熟化时间的成胶强度变化

2.6 正交试验优选调剖剂配方

影响耐碱性调剖剂性能的因素有很多,如聚合物质量浓度、聚合物相对分子质量、交联剂种类及浓度、助剂的种类,以及调剖剂中各化学试剂浓度及交互作用等^[20]。现只考虑离子型交联剂、有机交联剂、聚合物和pH值调节剂这4个主要因素对耐碱性调剖剂性能的影响,应用 $L_{25}(5^6)$ 正交表对耐碱性调剖剂配方进行考察,目的是确定影响耐碱性调剖剂性能的主要因素,为进一步研究和优化耐碱性调剖剂配方提供指导。正交试验结果表明,影响耐碱性调剖剂性能的4种因素主次关系依次为:pH值调节剂、有机交联剂、聚合物、离子型交联剂。得到的调剖剂配方为:相对分子质量为 $2\ 500\times 10^4$ 且质量浓度为 $2\ 000\text{ mg/L}$ 的聚合物、质量分数为0.15%的离子型交联剂YH-1、质量分数分别为0.1%和0.08%的有机交联剂THM-1和THM-2、质量分数为0.2%的稳定剂、质量分数为0.1%的除氧剂。

3 调剖剂性能评价

3.1 调剖剂对三元复合体系界面张力的影响

根据研究区块实际注入三元复合体系的情况,用质量分数为1.2%的氢氧化钠、质量分数为0.3%表面活性剂和质量浓度为 $2\ 000\text{ mg/L}$ 的聚合物配制三元复合体系,在第1、第3、第5和第10天测定三元复合体系的界面张力,分别为 3.42×10^{-3} 、 4.25×10^{-3} 、 4.83×10^{-3} 和 $5.12\times 10^{-3}\text{ mN/m}$ 。另一实验为对比实验,在配制好的三元复合体系中加入优选的调剖剂,测定复合体系在第1、第3、第5和第10天的界面张力,分别为 3.64×10^{-3} 、 4.87×10^{-3} 、 5.49×10^{-3} 和 $7.02\times 10^{-3}\text{ mN/m}$ 。此实验结果表明,调剖剂对三元复合体系界面张力的影响不大。

3.2 氢氧化钠质量分数对调剖剂性能的影响

为了评价三元复合体系中氢氧化钠质量分数对调剖剂性能的影响,进行了不同氢氧化钠质量分数下调剖剂成胶性能实验。采用优选的配方,加入交联剂4 h后,分别加入质量分数为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%和1.2%的氢氧化钠溶液。实验结果表明随着氢氧化钠质量分数的增加,调剖剂成胶后强度逐渐减小。在氢氧化钠质量分数为0时,即中性条件下,成胶后最大强度为 $7\ 500\text{ mPa}\cdot\text{s}$;当氢氧化钠质量分数达到1.2%,即pH值为12时,成胶强度为 $3\ 510\text{ mPa}\cdot\text{s}$,但仍可成胶。由此可见,所研制的调剖剂耐碱性较好,可应用于三元复合驱调剖。

3.3 缓凝剂质量分数对耐碱性调剖剂成胶时间的影响

采用优选的配方,加入交联剂4 h后,分别加入质量分数为0.05%、0.1%、0.15%和0.2%的缓凝剂,测定成胶性能。实验结果表明随着缓凝剂质量分数的增加,成胶时间延长。当缓凝剂质量分数为0时,成胶时间为102 h;当缓凝剂质量分数为0.1%时,成胶时间为222 h;当缓凝剂质量分数为0.2%时,成胶时间为366 h。因此,可以通过加入缓凝剂来调节成胶时间。

4 调剖驱油实验

为了研究调剖剂在三元复合驱调剖中的效果,进行了驱油实验。设计了3个实验方案,方案I为水驱至含水率为98%,方案II为水驱至含水率为95%—注入0.4倍孔隙体积的三元复合体系—后续水驱至含水率为98%,方案III为水驱至含水率为95%—注入0.2倍孔隙体积的三元复合体系—注入0.035倍孔隙体积的调剖剂—注入0.2倍孔隙体积的三元复合体系—后续水驱至含水率为98%。从实验结果(表2)可以看出,在三元复合体系中注入研制的调剖剂,能改善中、低渗透层的开发效果,3块岩心含水率最低值分别为46.5%、47.5%和44.7%,与水驱相比含水率下降最大幅度分别为48.5%、47.5%和50.3%;采收率分别为69.84%、69.31%和69.66%,比水驱分别提高采收率22.24%、21.71%和22.06%,比不使用调剖剂的三元复合驱分别提高采收率4.3%、3.77%和4.12%。3块岩心比不使用调剖剂的三元复合驱平均提高采收率4%左右。

表2 3种方案驱油效果

方案 编号	岩心 编号	渗透率/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$			含油 饱和 度,%	含水率 最低 值,%	采收 率,%	提高采收率,%	
		1层	2层	3层				与水驱 相比	与三元复 合驱相比
I	1	312	506	808	65.48	47.60			
II	2	298	509	817	65.14	52.6	65.54	17.94	
	3	302	489	794	64.93	46.5	69.84	22.24	4.3
III	4	307	514	818	65.65	47.5	69.31	21.71	3.77
	5	314	515	804	65.21	44.7	69.66	22.06	4.12

5 调剖剂段塞组合优化

为了模拟凝胶深部调剖的开发效果,应用CMG软件的STARS模块建立了理想模型。地质模型参

数依照杏一—二区东部Ⅱ块实际情况。井网类型是四注一采五点法井网,注采井距为150 m。

考虑到试验区进行三元复合驱,油藏pH值较高,在方案设计中加入了前置聚合物段塞和后续聚合物段塞,考察了聚合物质量浓度为1 500~2 500 mg/L、段塞尺寸为0.005~0.015倍孔隙体积前置的聚合物段塞和聚合物质量浓度为2 000 mg/L、段塞尺寸为0.01倍孔隙体积的后续聚合物段塞对开发效果的影响。数值模拟结果表明前置聚合物段塞对开发效果影响较大,后续聚合物段塞对开发效果影响不大。优选出的前置段塞为质量浓度为2 000 mg/L的0.01倍孔隙体积的聚合物溶液。调剖前加入0.01倍孔隙体积的前置聚合物段塞最终采收率为74.33%,比三元复合驱提高采收率4.58%,比不加前置聚合物段塞的三元复合驱调剖提高采收率0.56%。分析原因是:在注入调剖剂前,加入少量的前置聚合物段塞,能够稀释地层中残留的碱液,保证调剖剂具有更好的性能。同时对三元复合驱调剖的段塞大小进行了优选,得出0.035倍孔隙体积的调剖剂开发效果和经济效益最佳。

6 结论

在pH值为12的条件下,研制出了耐碱性调剖剂配方,该调剖剂成胶时间为102 h,成胶粘度为3 510 mPa·s;稳定时间大于60 d,抗盐性好,对三元复合体系界面张力影响不大。应用研制的调剖剂进行了驱油实验,结果表明该调剖剂应用于三元复合驱调剖时,能够改善三元复合驱的开发效果,比不使用调剖剂的三元复合驱提高采收率4%左右。数值模拟结果表明该调剖剂应用于三元复合驱调剖时,在调剖前加入小尺寸的前置聚合物段塞,调剖剂能有更好的调剖性能。

参考文献:

[1] 程杰成,王德民,李群,等.大庆油田三元复合驱矿场试验动态

特征[J].石油学报,2002,23(6):37-40.

- [2] 王德民.大庆油田“三元”“二元”“一元”驱油研究[J].大庆石油地质与开发,2003,22(3):1-9.
- [3] 李士奎,朱焱,赵永胜,等.大庆油田三元复合驱试验效果评价研究[J].石油学报,2005,26(3):56-58.
- [4] 王家禄,袁士义,石法顺,等.三元复合驱化学剂浓度变化的实验研究[J].中国科学: E 辑 技术科学,2009,39(6):1 159-1 166.
- [5] 邱茂君,岳湘安.丁苯胶乳深部调剖的适应性研究[J].油气地质与采收率,2011,18(1):51-53.
- [6] 陈铁龙,周晓俊,唐伏平,等.弱凝胶调驱提高采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [7] 王莘,戴彩丽,由庆,等.抗剪切耐盐无机铝凝胶深部调剖剂研究[J].油气地质与采收率,2013,20(6):100-103.
- [8] 陈渊,孙玉青,温栋良,等.聚合物纳米微球调驱性能室内评价及现场试验[J].石油钻探技术,2012,40(4):102-106.
- [9] 王楠,刘春杰,于情情,等.埕岛油田深部调剖体系研究及适应性评价[J].石油天然气学报,2011,33(8):147-150.
- [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] 吴正伟,王合良,聂成. HPAM/Cr³⁺弱凝胶调剖封堵性能研究[J].石油天然气学报,2012,32(8):368-370.
- [12] 熊春明,唐孝芬.国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势[J].石油勘探与开发,2007,34(2):83-88.
- [13] 孟祖超,王小泉,陈光.一种新型凝胶调剖剂的室内研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(4):65-68.
- [14] 冯其红,张安刚,蔡荣蔚,等.层间调剖注入参数优化设计[J].油气地质与采收率,2011,18(5):81-84.
- [15] Zhang K, Qin J S, Chen X L. Double action of Cr³⁺ gel on modifying profile and removing CaCO₃ in ASP flooding [J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(5): 445-457.
- [16] Kazempour M, Alvarado V. Geochemically based modeling of pH-sensitive polymer injection in Berea sandstone [J]. Energy Fuels, 2011, 25(9): 4 024-4 035.
- [17] 赵晓非,于庆龙,晏凤,等.有机铬弱凝胶深部调剖体系的研究及性能评价[J].特种油气藏,2013,20(3):114-117.
- [18] 赵清民,吕静,李先杰,等.非均质条件下乳状液调剖机理[J].油气地质与采收率,2011,18(1):41-43,47.
- [19] 王明,杜利,国殿斌,等.层间非均质大型平面模型水驱波及系数室内实验研究[J].石油实验地质,2013,35(6):698-701.
- [20] 李建阁,吴文祥,张丽梅.耐碱凝胶体系的研制与应用[J].科学技术与工程,2010,25(9):6 172-6 175.

编辑 刘北羿