

高性能深部调驱体系试验

赵修太¹, 白英睿¹, 王增宝¹, 高元², 尚校森¹

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580
2. 中国石化石油工程技术研究院固井完井所, 北京 100101

摘要 应用交联聚合物体系对油层进行深部调驱可有效提高原油采收率。在 70℃条件下, 通过正交试验优选出了一种交联聚合物调驱体系, 其主剂基本组成为 0.30% 聚合物+0.08% 有机铬+0.10% 六亚甲基四胺+0.08% 苯酚。为延长该体系的成胶时间, 考查了延迟交联剂草酸钠(SO)对体系成胶时间和强度的影响。选定 SO 的质量分数为 0.04% 时, 体系的成胶时间约为 48h, 成胶强度约为 0.057MPa。矿化度、温度、pH 值等因素可对体系的成胶性能产生影响。在 70℃条件下, 当 Na⁺质量浓度小于 36000mg/L, CaCl₂ 质量浓度小于 1000mg/L, pH 值为 5—7 时, 体系具有较好的成胶性能; 体系在 60—90℃条件下生成的冻胶强度大于 0.056MPa。使用单管岩心驱替试验模拟了体系的调驱性能, 结果表明, 体系的调驱效果较好, 水驱后采收率提高幅度高达 20% 以上, 封堵率大于 95%, 加之 70℃下成胶时间在 48h 以上, 可以达到油层深部调驱的目的。

关键词 高性能; 深部调驱; 成胶时间; 突破真空度

中图分类号 TE357

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.06.005

Laboratory Experiment on the High Performance System for Deep Profile Control and Flooding

ZHAO Xiutai¹, BAI Yingrui¹, WANG Zengbao¹, GAO Yuan², SHANG Xiaosen¹

1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, Shandong Province, China
2. Well Completion and Cementing Department, Sinopec Petroleum Engineering Research Institute, Beijing 100101, China

Abstract The recovery efficiency of oil could be enhanced by using compound cross-linking polyacrylamide system of deep profile control and flooding. The formula contained main agents of a cross-linking polyacrylamide system which consisted of 0.30% HPAM, 0.08% organic chromium, and 0.10% hexamethylenetetramine is optimized by orthogonal test under the 70℃ condition. In order to prolong the gel time of system, the effects of delayed cross-linker SO on gel time and gel strength are researched. Gel time of system is 48h and gel strength is 0.057MPa when the concentration of SO is 0.04%. The performance of system could be affected by salinity, temperature, pH value, and other factors. When the concentration of Na⁺ is under 36,000 mg/L, the concentration of Ca²⁺ is below 1,000mg/L, the gel strength of system could be higher than 0.040MPa. When pH is between five and seven, the gel strength of system could be above 0.065MPa; however, the gel time is shorter. When temperature is between 60℃ and 90℃, the gel strength of system is about 0.056MPa and changes slightly, however when temperature is between 50℃ and 60℃, the gel strength of system changes greatly. The deep profile control and flooding performance of system is researched by using single tube core displacement experiment. The results show that the oil recovery could be enhanced about 20% after water flooding and the plugging rate is higher than 90% by using that system. Because the gel time of system is above 48h, therefore the performances of that cross-linking polyacrylamide system could satisfy the requirements for deep profile control and flooding in oil layers.

Keywords high performance; deep profile control and flooding; gel time; breakthrough vacuum

0 引言

随着中国东部各大油田相继进入注水开发中后期, 采出

液含水率不断升高。采用调剖堵水技术来改善吸水剖面, 提高驱替介质的波及系数一直都是油田实现“稳油控水”的重

收稿日期: 2011-10-07; 修回日期: 2012-02-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(27R1202006A)

作者简介: 赵修太, 教授, 研究方向为提高采收率和采油化学, 电子信箱: zhaopt@upc.edu.cn

要手段之一。自 20 世纪 60 年代以来,中国的调剖堵水技术经历了油井堵水、注水井单井调剖、井组区块调剖、油藏整体调剖 4 个发展阶段^[1]。20 世纪 90 年代初期形成了注水井的压力指数(PI)决策技术、油藏工程(RE)决策技术和区块整体调剖优化(RS)决策技术^[2],中后期提出了调驱的概念,即将聚合物驱油技术与调剖堵水技术结合起来,实现调剖驱油一体化。周志齐等^[3]报道了交联聚合物调驱技术在胜利油区孤东、孤岛等油田的矿场应用,使用该技术后聚合物的窜流状况得到了有效抑制,先导试验区原油采收率提高了 5.4%。21 世纪初,调驱进一步深化为深部调驱一体化,以实现油层尤其是非均质层深部原油的开采。该项技术在新疆油区彩南油田滴 12 井区进行了早期应用,措施井的日产油量增加了 50% 左右,综合含水率下降了 2%,效果明显^[4]。目前,高温、高盐、低渗、海上等复杂油藏的开发日益增多,油藏内的残余油饱和度降低,常规深部调驱方法与体系已不能满足要求,因此将深部调驱技术与油藏精细描述相结合,实现油藏的精细调驱,整体调驱是研究重点之一。本文采用自制有机铬为一次交联剂,六亚甲基四胺和苯酚为二次交联剂与部分水解聚丙烯酰胺复配,研制双基团交联聚合物深部调驱体系,并对其性能进行试验分析。

1 试验

1.1 药品及仪器

TSG-825 阴离子型聚丙烯酰胺,相对分子质量为 1400 万,水解度为 20%—30%,固含量 $\geq 91\%$,河北天时化工有限公司;有机铬,实验室自制;六亚甲基四胺、苯酚,分析纯(AR),国药集团化学试剂公司;延迟交联剂草酸钠(SO),工业品。

SHB-B95 型循环水式多用真空泵,江苏金坛市中大仪器厂;2PBOOC 型恒流泵,郑州市长城科工贸有限公司;HH-600 型恒温水浴锅,龙口市先科仪器公司;FC104 型精密天平,上海天平仪器厂;YB-105B 型精密压力表,上海自动化仪表股份有限公司等。

1.2 冻胶强度的测定方法

在试验过程中,应用目测法和突破真空度法测定冻胶的强度。目测冻胶强度代码表,A 代表检测不出连续冻胶形式;B 代表高度流动冻胶,体系黏度略有增加;C 代表流动冻胶,有轻微挂壁现象;D 代表中等流动冻胶,有明显挂壁现象;E 代表难流动冻胶,大部分冻胶挂壁;F 代表高度变形不流动冻胶,冻胶全部挂壁;G 代表中等变形不流动冻胶,有较长舌长;H 代表轻微变形不流动冻胶,有很短舌长;I 代表刚性冻胶,无舌长。

用突破真空度(突破真空压力)法测试冻胶强度,装置如图 1 所示。

1.3 调驱试验方法

在考查调驱体系的驱油、调剖效果时,常采用岩心流动实验(物理模拟实验)进行研究。本文主要应用单管岩心驱替

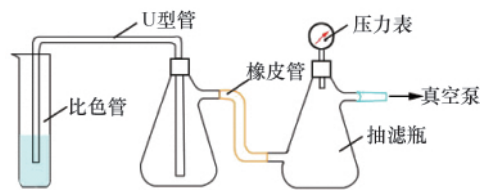


图 1 突破真空度法测冻胶强度示意图

Fig. 1 Scheme of breakthrough vacuum method for testing gel strength

试验,模拟在不同渗透性的地层中交联聚合物体系的流动形式、吸收程度以及形成冻胶的封堵效果。单管岩心驱替试验装置图如图 2 所示。

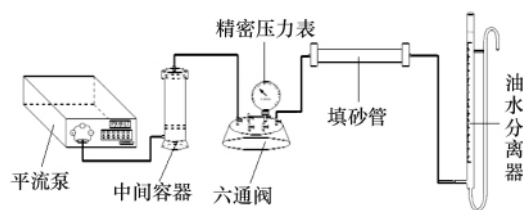


图 2 单管岩心驱替试验装置图

Fig. 2 Scheme for the equipment of single core plugging experiment

2 结果与讨论

采用正交试验法确定的交联聚合物调驱体系的主剂配方为 0.30% 聚合物+0.08% 有机铬+0.10% 六亚甲基四胺+0.08% 苯酚。在 70℃ 条件下,该体系的成胶时间约为 34h,突破真空度为 0.070MPa。为延长体系的成胶时间,使之达到延迟交联、深部调驱的目的,需加入延迟交联剂。

2.1 延迟交联剂 SO 对体系的影响

确定体系的组成后,通过添加延迟剂延长体系的成胶时间。本文针对此体系所使用的延迟交联剂为 SO。加入不同质量分数的 SO 对体系的影响如图 3 所示。

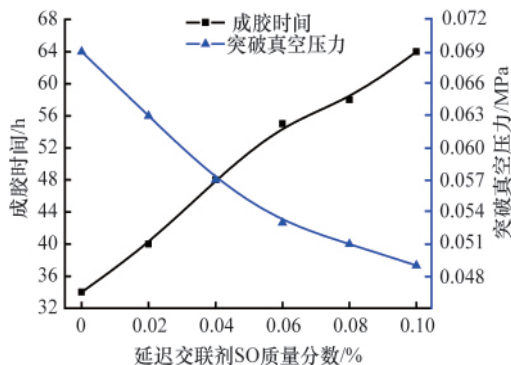


图 3 SO 质量分数对体系的影响

Fig. 3 Effects of SO mass concentration on gel system

由图 3 可知,随着 SO 质量分数的增加,体系的成胶时间

明显延长,但体系生成冻胶的强度呈下降趋势。这是由于延迟交联剂 SO 在溶液中水解产生 —COO^- ,也会交联一部分 Cr^{3+} ,从而与聚合物分子链中的 —COO^- 发生竞争交联, Cr^{3+} 与聚合物中羧基的交联几率降低,导致体系的成胶时间延长;另一方面, Cr^{3+} 可能与 SO 以及 HPAM (阴离子型聚丙烯酰胺或部分水解聚丙烯酰胺)同时交联,使得 HPAM 与 Cr^{3+} 交联后不易生成体型结构,从而使体系生成冻胶的强度降低。本文确定了 SO 质量分数为 0.04%,此时体系的成胶时间约为 48h,成胶强度约为 0.057MPa,可满足油层深部调堵的要求。

2.2 矿化度对体系的影响

向体系中加入不同质量浓度的 NaCl 和 CaCl_2 ,考查矿化度对体系的影响,结果如图 4 所示。

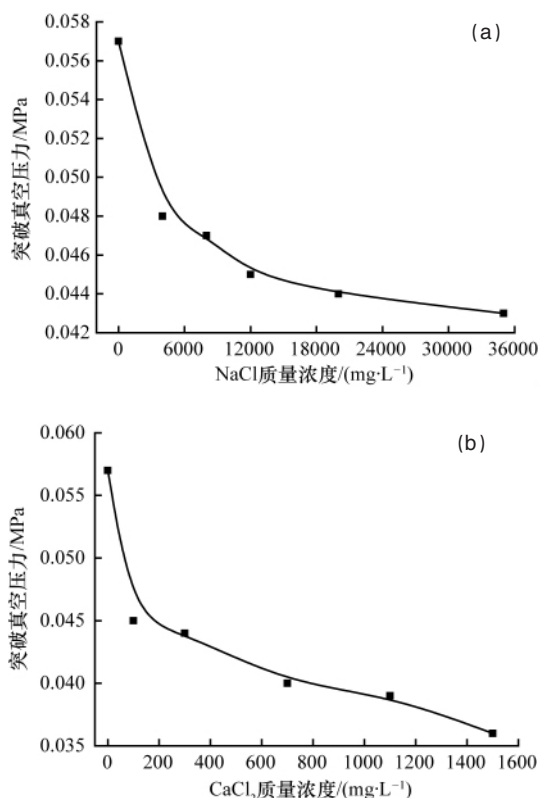


图 4 NaCl(a)和 CaCl_2 (b)质量浓度对体系的影响

Fig. 4 Effects of NaCl (a) and CaCl_2 (b) mass concentration on gel system

由图 4 可以看出,当 NaCl 和 CaCl_2 质量浓度较低(NaCl 质量浓度 $<4000\text{mg/L}$, CaCl_2 质量浓度 $<100\text{mg/L}$)时,随着质量浓度升高,体系强度急剧下降,而后降幅变缓。原因是 HPAM 在水中解离,形成扩散双电层,产生许多带负电的链段,从而在水中形成松散的无规线团,当盐加入后,金属离子对扩散双电层有压缩作用,使得聚合物发生蜷曲,影响了聚合物分子中的羧基、酰胺基与交联剂的交联,使得交联体系的交联密度降低,强度下降。在金属离子质量浓度较低时,聚合物分子发生一定程度的蜷曲,影响了聚合物分子之间的交联;当

金属离子质量浓度进一步增大时,交联体系开始发生分子内交联,从而在一定程度上延迟了成胶体系强度的下降^[5]。总体上分析,当 NaCl 质量浓度低于 36000mg/L , CaCl_2 质量浓度低于 1000mg/L 时,体系的成胶强度均在 0.040MPa 以上,可满足对油层进行弱凝胶调驱的要求。

2.3 温度对体系的影响

将交联聚合物体系溶液分别放置在不同温度下反应,考察温度对体系成胶性能的影响,结果如图 5 所示。

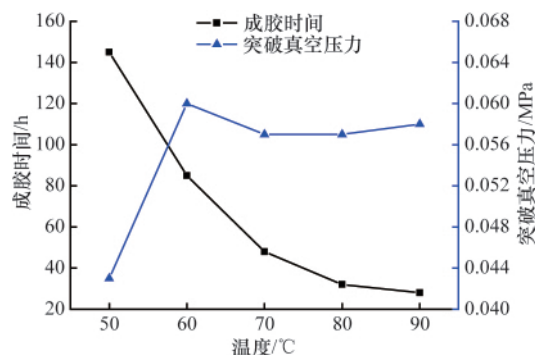


图 5 温度对体系的影响

Fig. 5 Effects of temperature on gel system

从图 5 可以看出,温度越高,体系的成胶时间越短。当温度在 $50\text{—}60\text{°C}$ 时,体系的成胶强度迅速增高;当温度高于 60°C 后成胶强度变化不大,均在 0.056MPa 以上。这是因为温度升高,分子运动加剧,交联剂分子与 HPAM 发生碰撞的概率增加,从而使交联几率增加,宏观表现为成交时间缩短。而当温度较低时,六亚甲基四胺不易释放出甲醛来与苯酚反应生成交联剂酚醛树脂,与聚合物间的交联反应几率较小。因而该体系适用于温度高于 60°C 的油层,但是由于当温度过高($>93\text{°C}$)时,聚合物的降解剧烈,体系的使用温度最好也不要高于 90°C 。

2.4 pH 值对体系的影响

在 70°C 条件下,通过调节未加入延迟交联剂 SO 时交联聚合物体系溶液的 pH 值,考查 pH 值对体系成胶性能的影响,结果如图 6 所示。

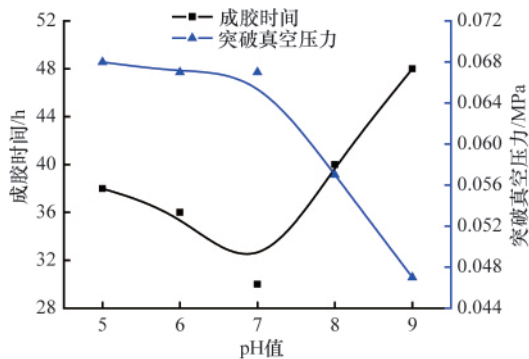


图 6 pH 值对体系的影响

Fig. 6 Effects of pH value on gel system

结果表明,体系在 pH 值为 5—8 时均可形成具有较高强度的冻胶,在 pH 值为 5—7 时成胶强度均达 0.065MPa 左右,但成胶时间相对较短;当 pH>7 后,生成的冻胶强度呈下降趋势,但成胶时间性对延长。试验中还发现,当体系 pH 值低于 5 时,形成的冻胶较脆,且易脱水。这是因为当溶液呈酸性时,聚合物分子链中的羧基不易电离,以酸基的形式存在,不易与 Cr^{3+} 形成配位体;pH 值为 5—7 时,聚合物电离度增大, Cr^{3+} 具有很好的活性,并且此时六亚甲基四胺可以释放出大量的甲醛,因此形成的冻胶强度较大,成胶时间也较短;当溶液碱性增大时,六亚甲基四胺不易释放甲醛,使生成冻胶的强度下降。

2.5 调驱试验研究

采用单管岩心驱替装置对调驱体系进行调驱试验,模拟交联聚合物溶液在渗透层中的流动,并对该体系的驱油和调剖效果进行评价。体系调驱试验数据如下:封堵前水测渗透率为 $1.092\mu\text{m}^2$,孔隙度为 29.19%,水驱末采收率为 49.18%,聚驱末采收率为 70.22%,提高采收率幅度为 21.04%,封堵后水测渗透率为 $0.051\mu\text{m}^2$,封堵率为 95.33%。

从试验数据可知,该体系具有较好的调驱性能。进行驱油试验时,水驱末向岩心中注入 0.3 倍孔隙体积(0.3PV)的交联聚合物溶液后再进行水驱,提高采收率幅度达到 21.04%;进行调剖试验时,向岩心中注入 0.5PV 的交联聚合物溶液,待其成胶后测得水相渗透率由封堵前的 $1.092\mu\text{m}^2$ 降至封堵后的 $0.051\mu\text{m}^2$,封堵率高达 95.33%。该体系的成胶时间达 2d 以上,驱油效果好,封堵强度高,对油藏适应性强,适于进行油层的深部调驱。

3 结论

(1) 正交试验确定体系主剂的最佳配方为 0.30% 聚合物+0.08% 有机铬+0.10% 六亚甲基四胺+0.08% 苯酚,此时体系

的成胶时间较短;加入质量分数为 0.04% 的 SO 后,70℃ 条件下体系的成胶时间为 48h。

(2) 体系具有较好的抗盐能力,在 NaCl 质量浓度小于 36000mg/L, CaCl_2 质量浓度小于 1000mg/L 时体系形成冻胶强度均在 0.040MPa 以上;在 60—90℃ 条件下,温度对体系的成胶强度影响不大,体系成胶强度均在 0.056MPa 以上;在无 SO 加入时,70℃ 条件下,pH 值为 5—7 时,体系生成的冻胶强度约为 0.065MPa。体系的调驱效果较好,水驱后提高采收率幅度高达 20% 以上,封堵率大于 95%,加之 70℃ 下成胶时间在 2d 以上,可以达到油层深部调驱的目的。

参考文献 (References)

- [1] 由庆,于海洋,王业飞,等.国内油田深部调剖技术的研究进展[J].断块油气田,2009,16(4):68-71.
You Qing, Yu Haiyang, Wang Yefei, et al. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 16(4): 68-71.
- [2] 李宜坤,覃和,蔡磊.国内堵水调剖的现状与发展趋势[J].钻采工艺,2006,29(5):105-106,123.
Li Yikun, Qin He, Cai Lei. *Drilling & Production Technology*, 2006, 29(5): 105-106, 123.
- [3] 周志齐,张毅.胜利油田交联聚合物调驱技术研究及应用[J].西安石油学院学报:自然科学版,2000,15(5):21-24.
Zhou Zhiqi, Zhang Yi. *Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition*, 2000, 15(5): 21-24.
- [4] 宫兆波,乔跃华,刘清明,等.滴12井区八道湾组油藏深部调驱技术早期应用效果[J].新疆石油地质,2011,32(4):406-408.
Gong Zhaobo, Qiao Yuehua, Liu Qingming, et al. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(4): 406-408.
- [5] 何启平,施雷庭,郭智栋,等.适合高温高矿化度油藏的弱凝胶体系研究[J].钻采工艺,2011,34(2):79-82.
He Qiping, Shi Leitong, Guo Zhidong, et al. *Drilling & Production Technology*, 2011, 34(2): 79-82.

(责任编辑 安莹,刘志远)

· 学术动态 ·

“第十六次全国儿科中西医结合 学术会议”征文



“第十六次全国儿科中西医结合学术会议”将于 2012 年 9 月 15—17 日在北京召开。本次大会由中国中西医结合学会儿科专业委员会主办。

征稿范围:中西医结合及中医、西医各专业的临床论著、实验研究和专题综述;临床疑难、重症、少见病例报道;中西医结合药理或诊断研究;中西医结合理论及方法研究等。对儿科中西医结合工作的建议等。

论文截稿日期:2012 年 8 月 1 日

联系电话:13621146657, 010-63138554

电子信箱:zxyek@sina.com

会议网站:http://www.caim.org.cn